

การทดสอบสมรรถนะและแนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพ
ของเครื่องสูบน้ำแบบไหลตามแนวแกน
PERFORMANCE TEST AND GUIDELINES FOR IMPROVING
THE EFFICIENCY OF AXIAL FLOW PUMPS



ปฏิญญานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบสมรรถนะและแนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพ
ของเครื่องสูบน้ำแบบไหลตามแนวแกน
PERFORMANCE TEST AND GUIDELINES FOR IMPROVING
THE EFFICIENCY OF AXIAL FLOW PUMPS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PERFORMANCE TEST AND GUIDELINES FOR IMPROVING
THE EFFICIENCY OF AXIAL FLOW PUMPS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2564

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การทดสอบสมรรถนะและแนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำแบบไหลตามแนวแกน

PERFORMANCE TEST AND GUIDELINES FOR IMPROVING THE EFFICIENCY OF AXIAL FLOW PUMPS

ผู้จัดทำ

- | | | |
|---------------------|----------------|-----------------------|
| 1. นาย กรรชัย | พิริยะธน์วัฒน์ | รหัสนักศึกษา 61010024 |
| 2. นางสาว ณัฐฐนิช | ชิดช่วงชัย | รหัสนักศึกษา 61010305 |
| 3. นางสาว ธิยานันท์ | กลมพันธ์ | รหัสนักศึกษา 61010512 |



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร.จาร์วัตร เจริญสุข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบสมรรถนะและแนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำแบบไหลตาม
แนวแกน

นายกรรชัย พิริยะธวัฒน์ 61010024
นางสาวณัฐนิช ชิดช่วงชัย 61010305
นางสาวธิยานันท์ กลมพันธ์ 61010512
รศ.ดร.จาร์วัตร เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2564

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็น การนำเสนอกะบวนการทดสอบสมรรถนะของเครื่องสูบน้ำขนาด 10 นิ้ว 2 ชุด รวมถึงการนำผลจากการทดสอบภาคสนามมาหาค่าความคลาดเคลื่อนตามมาตรฐาน JIS B 8301 และได้ทำการนำเสนอแนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำควบคู่ไปด้วยกับการทดสอบ โดยการนำต้นแบบใบพัดและครีบริยงกระแสมาจากโครงการพัฒนาเครื่องสูบน้ำ พญานาคขนาด 10 นิ้วสำหรับการเกษตรและการระบายน้ำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิง คำนวณ (CFD) ซึ่งใช้ใบพัดและครีบริยงกระแสเพียงชุดเดียว เพื่อนำมาวิเคราะห์สนามการไหลและ หาแนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพเครื่องสูบน้ำ โดยการนำต้นแบบครีบริยงกระแสข้างต้นมาทำ การปรับเปลี่ยนรูปทรงและความหนา หรือเพิ่มครีบริยงกระแสน้ำรองเพื่อช่วยลดการหมุนควงที่ ทางออกของเครื่องสูบน้ำ โดยขั้นตอนในการปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำนั้นทำโดยใช้ CFD ในการคำนวณ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องสูบน้ำต่อไปในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PERFORMANCE TEST AND GUIDELINES FOR IMPROVING THE EFFICIENCY OF AXIAL
FLOW PUMPS

Kanchai	Piriyatanawat	61010024
Nattanich	Chidchuangchai	61010305
Thiyanan	Klompan	61010512
Assoc. Prof. Dr. Jaruwat Charoensuk		Advisor
YEAR 2021		

ABSTRACT

This project presents the performance testing process of a 10-inch 2-stage pump including the calculation of the results obtained from the actual test for uncertainty and compared with the results based on the uncertainty values from JIS B 8301. Also, introduced guidelines for improving the efficiency by using the impeller and guide-vane prototypes from the 10-inch water pump development project for agriculture and drainage which were analyzed by the computational fluid dynamics (CFD) method for only 1 stage in order to analyze the flow field and find ways to improve pump efficiency which was performed by modifying the shape and thickness of a guide-vane prototype or adding a splitter-vane to help reduce swirl flow at the pump outlet. The procedure for improving pump efficiency is through computational fluid dynamics analysis (CFDs) are calculated as a guideline for the further development of pumps in the future.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ก็เพราะความอนุเคราะห์ ความเอาใจใส่ แนะนำ และความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เสมอมาจาก รองศาสตราจารย์ ดร.จรรุวัตร เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และนายวิวัฒน์ แสงศิริชัย ผู้ช่วยนักวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่เอื้อเพื่อให้ยืมเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการนี้ และขอบคุณนายอุกฤษฏ์ คงเตี้ย นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือด้านต่าง ๆ ในการทำโครงการนี้

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นายกรรชัย	พิริยะธน์วัฒน์
นางสาวณัฐฐนิช	ชิตช่วงชัย
นางสาวธิยานันท์	กลมพันธ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	II
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
รายการสัญลักษณ์.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ความหมายของเครื่องสูบน้ำ.....	4
2.2 การจำแนกประเภทเครื่องสูบน้ำ.....	4
2.2.1 แบ่งตามลักษณะการเพิ่มพลังงานให้กับของไหล.....	5
2.2.2 แบ่งตามลักษณะการขับเคลื่อนของไหลในเครื่องสูบน้ำ.....	5
2.3 ตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์เครื่องสูบน้ำ.....	7
2.3.1 ประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำ (Pump performance).....	7
2.3.2 สัมประสิทธิ์ของการไหล (Flow coefficient).....	8
2.3.3 สัมประสิทธิ์ของเฮด (Head coefficient).....	8
2.3.4 สัมประสิทธิ์ของกำลัง (Power coefficient).....	8
2.3.5 ความเร็วจำเพาะ (Specific speed).....	9
2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำ.....	11
2.5 รูปแบบสนามการไหลโดยทั่วไปของเครื่องสูบน้ำพญานาคที่ใช้งานในประเทศไทย.....	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 การไหลแบบหมุนวน (Recirculation flow)	12
2.5.2 การไหลแบบหมุนควง (Swirl flow).....	13
2.6 กฎความคล้ายของเครื่องสูบน้ำ (Affinity Laws)	14
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	18
3.1 เกณฑ์การออกแบบพัฒนาชุดทดสอบ.....	18
3.1.1 หลักในการสร้างและเกณฑ์การออกแบบบ่อสูบ.....	18
3.1.2 เกณฑ์การออกแบบฝาย (Weir) ช่องทางน้ำและตะแกรงกันกระเพื่อม	20
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	22
3.2.1 ชุดควบคุมอัตราการไหลของน้ำ	22
3.2.2 ชุดวัดความเร็วรอบของเพลาชุดทดสอบ.....	23
3.2.3 ชุดวัดกำลังทางไฟฟ้าของมอเตอร์	24
3.2.4 ชุดวัดแรงดึงมอเตอร์	25
3.2.5 ชุดต้นกำลังของชุดทดสอบ.....	25
3.2.6 ชุดต้นกำลังของชุดทดสอบ.....	25
3.2.7 ชุดต้นกำลังของชุดทดสอบ.....	25
3.3 มาตรฐานการทดสอบสมรรถนะของชุดทดสอบ	26
3.3.1 ความผันผวน และความแปรเปลี่ยน	26
3.3.2 เงื่อนไขขั้นตอนการทดสอบ.....	28
3.3.3 Overall uncertainty.....	28
3.4 ขั้นตอนการทดสอบเครื่องสูบน้ำ.....	29
บทที่ 4 แนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพ ของเครื่องสูบน้ำแบบไหลตามแนวแกน.....	31
4.1 การสร้างแบบจำลอง CFD.....	31
4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับปรุง.....	33
4.2.1 มุมองศาที่ทางเข้าและทางออกของใบพัดหรือครีบริบเรียงกระแส.....	33
4.2.2 ระยะจากโคนใบถึงปลายใบ	33
4.3 แนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพ.....	33

4.3.1 การเปลี่ยนลักษณะของครีบเรียงกระแสน้ำหลัก.....	35
4.3.2 การติดตั้งครีบเรียงกระแสน้ำร่องหรือสปลิตเตอร์เวน.....	39
4.3.3 การศึกษาตำแหน่งในการติดครีบเรียงกระแสน้ำร่อง.....	42
บทที่ 5 ผลการทดสอบ การวิเคราะห์ผล และการคำนวณ.....	49
5.1 ขั้นตอนการคำนวณ.....	49
5.1.1 การคำนวณประสิทธิภาพโดยรวม.....	49
5.1.2 การคำนวณหาความคลาดเคลื่อนของประสิทธิภาพ.....	49
5.1.3 การคำนวณเพื่อสร้างกราฟ Dimensionless performance curve.....	49
5.1.4 การคำนวณหาประเภทของเครื่องสูบน้ำ.....	50
5.2 ตัวอย่างการคำนวณ.....	50
5.2.1 การคำนวณหาประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องสูบน้ำ.....	50
5.2.2 การคำนวณหาความคลาดเคลื่อน.....	52
5.3 ผลการทดสอบของเครื่องสูบน้ำ 5 จุดทดสอบ.....	61
5.4 กราฟแสดงสมรรถนะของเครื่องสูบน้ำ.....	62
5.5 การสอบเทียบ weir.....	65
บทที่ 6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	68
6.1 สรุปผลการทดสอบที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 1450 rpm ทั้ง 5 จุดทดสอบ.....	68
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	69
6.2.1 การทดสอบเครื่องสูบน้ำในชุดทดสอบภาคสนาม.....	69
6.2.2 การทำแบบจำลองเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพ.....	69
6.3 ผลการทดสอบเพิ่มเติม.....	69
เอกสารอ้างอิง.....	74
ภาคผนวก ก.....	76
ภาคผนวก ข.....	84

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของลักษณะใบพัดกับความเร็วจำเพาะ [3].....	10
ตารางที่ 3.1 รายละเอียดขั้นต่ำในการออกแบบบ่อสูบ.....	18
ตารางที่ 3.2 รายละเอียดขั้นต่ำในการออกแบบช่องทางน้ำ	21
ตารางที่ 3.3 เปอร์เซ็นต์ความผันผวนของข้อมูลกับค่ากลางที่ยอมรับได้.....	27
ตารางที่ 3.4 ค่าของความไม่แน่นอนโดยรวมที่ยอมรับได้.....	28
ตารางที่ 3.5 ค่าความไม่แน่นอนโดยรวมของประสิทธิภาพ	29
ตารางที่ 4.1 การกำหนด Boundary Condition เพื่อทำการวิเคราะห์เครื่องสูบน้ำ	32
ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพ เฮดและแรงบิดของครีบริยงกระแสน้ำรอง ทั้ง 4 แบบ	43
ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพ เฮดและแรงบิดของครีบริยงกระแสน้ำรอง เวอร์ชัน 1 ที่ติดตั้งในระยะ 0.65 m และ 0.70 m.....	46
ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพ เฮดและแรงบิดของครีบริยงกระแสน้ำรอง เวอร์ชัน 1 ติดตั้งตามแนวรัศมีตำแหน่ง A, B, C, D และ E	47
ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบความเร็วรอบมอเตอร์ 1450 rpm ทั้ง 5 จุดทดสอบ	50
ตารางที่ 5.2 ข้อมูลเบื้องต้นของการทดสอบ	51
ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบที่ความเร็วรอบ 1450 rpm.....	61
ตารางที่ 5.4 ค่าความคลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์	62
ตารางที่ 5.5 ผลการสอบเทียบ weir กับ electromagnetic flow meter ก่อนการปรับสมการ	66
ตารางที่ 5.6 ผลการสอบเทียบ weir กับ electromagnetic flow meter หลังการปรับสมการ.....	67
ตารางที่ 6.1 ค่าความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์ที่จุดทดสอบวาล์วเปิดสุด จากผลการทดสอบเพิ่มเติม.....	73
ตารางที่ ก.1 แสดงการกำหนดขนาดความหนาที่ตำแหน่งต่างๆ ของ NACA 0006.....	77
ตารางที่ ก.2 แสดงการหามุมของกระแสที่ทางออกด้วยความเร็วใน u, v, w	78

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงพลังงานจากต้นกำลังไปเป็นการเพิ่มแรงดันให้แก่ของไหล	4
รูปที่ 2.2 การแบ่งประเภทของเครื่องสูบน้ำตามลักษณะการขับเคลื่อนของไหล	6
รูปที่ 2.3 ทิศทางการไหลของของไหลออกจากใบพัด	9
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วจำเพาะกับลักษณะใบพัด	10
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำ	11
รูปที่ 2.6 คุณลักษณะของเครื่องสูบน้ำแบบเหวี่ยงหนีศูนย์กลางกับแบบไหลตามแนวแกน	11
รูปที่ 2.7 การไหลแบบหมุนวน (แนวลูกศรสีดำ)	12
รูปที่ 2.8 การไหลแบบหมุนวนภายในช่องการไหลบริเวณครีบริยงกระแส	12
รูปที่ 2.9 การไหลแบบหมุนวนจากการจำลองการไหลของใบพัด ที่ไม่ได้ติดตั้งครีบริยงกระแส	13
รูปที่ 2.10 การไหลแบบหมุนวน จากการจำลองการไหลของใบพัดที่ติดตั้งครีบริยงกระแส	13
รูปที่ 2.11 ตัวอย่างสมรรถนะของเครื่องสูบน้ำเมื่อความเร็วการหมุนของใบพัดเปลี่ยนไป	14
รูปที่ 2.12 ระเบิดไม้ "เทพฤทธิ"	15
รูปที่ 2.13 มรว.เทพฤทธิ เทวกุล ในการสาธิตเผยแพร่ท่อสูบน้ำ "เทพฤทธิ" ขับเคลื่อนด้วย	16
รูปที่ 2.14 เส้นกราฟแสดงสมรรถนะของระเบิดเทพฤทธิ	16
รูปที่ 2.15 ระยะเวลาติดตั้งเครื่องมือวัด	17
รูปที่ 2.16 รายละเอียดการติดตั้งอุปกรณ์เครื่องมือวัดตามมาตรฐาน JIS B 8301	17
รูปที่ 3.1 ขนาดมาตรฐานของบ่อสูบสำหรับเครื่องสูบน้ำ 3,000 ถึง 300,000 แกลลอนต่อนาที	19
รูปที่ 3.2 (ก) และ (ข) แสดงแผนภาพของชุดทดสอบ	19
รูปที่ 3.3 ภาพหน้าตัดของแผ่นฝาย	20
รูปที่ 3.4 แผนภาพการกำหนดระยะของช่องทางน้ำ	21
รูปที่ 3.5 Electromagnetic flow meter สำหรับวัดอัตราการไหล	22
รูปที่ 3.6 Globe valve สำหรับควบคุมอัตราการไหล	22
รูปที่ 3.7 อุปกรณ์วัดความเร็วรอบ (Tachometer)	23
รูปที่ 3.8 Pressure Transmitter	23
รูปที่ 3.9 อุปกรณ์วัดกำลังทางไฟฟ้าของมอเตอร์	24
รูปที่ 3.10 Torque sensor	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.11 DC Motor ชนิด Vertical type	25
รูปที่ 4.1 ลักษณะการแบ่งพื้นที่ของไหล (Fluid domain) 3 ส่วน.....	31
รูปที่ 4.2 ลักษณะครีบบนของครีบริยงกระแสน้ำตัวตันแบบที่ span 0.....	34
รูปที่ 4.3 ลักษณะครีบริยงกระแสน้ำแบบ 2 มิติ แกน Z-R.....	34
รูปที่ 4.4 ลักษณะครีบริยงกระแสน้ำของตัวตันแบบ แบบ 3 มิติ	35
รูปที่ 4.5 โพรไฟล์ความหนาของครีบริยงกระแสน้ำหลักตัวตันแบบ	35
รูปที่ 4.6 ลักษณะรูปทรงที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงฉุด	36
รูปที่ 4.7 ลักษณะครีบริยงกระแสน้ำทรงไฮโดรฟอยล์ แบบ 3 มิติ	37
รูปที่ 4.8 ลักษณะครีบบนของครีบริยงกระแสน้ำทรงไฮโดรฟอยล์ที่ span 0	37
รูปที่ 4.9 โพรไฟล์ความหนาของครีบริยงกระแสน้ำหลักทรงไฮโดรฟอยล์	37
รูปที่ 4.10 กราฟเปรียบเทียบอัตราการไหลกับประสิทธิภาพของครีบริยงกระแสน้ำตัวตันแบบ กับครีบริยงกระแสน้ำทรงไฮโดรฟอยล์.....	38
รูปที่ 4.11 กราฟเปรียบเทียบอัตราการไหลกับเสดของครีบริยงกระแสน้ำตัวตันแบบกับ ครีบริยงกระแสน้ำทรงไฮโดรฟอยล์	38
รูปที่ 4.12 การไหลแบบหมุนควงบริเวณหลังครีบริยงกระแสน้ำ	39
รูปที่ 4.13 ลักษณะครีบริยงกระแสน้ำที่ติดตั้งครีบริยงกระแสน้ำร่อง แบบ 3 มิติ	40
รูปที่ 4.14 ลักษณะครีบริยงกระแสน้ำแบบ 2 มิติ แกน Z-R.....	40
รูปที่ 4.15 ลักษณะครีบบนของครีบริยงกระแสน้ำที่ติดตั้งครีบริยงกระแสน้ำร่องที่ span 0.5.....	40
รูปที่ 4.16 กราฟเปรียบเทียบอัตราการไหลกับประสิทธิภาพของครีบริยงกระแสน้ำตัวตันแบบ กับครีบริยงกระแสน้ำที่มีครีบริยงกระแสน้ำร่อง	41
รูปที่ 4.17 กราฟเปรียบเทียบอัตราการไหลกับเสดของครีบริยงกระแสน้ำตัวตันแบบกับ ครีบริยงกระแสน้ำที่มีครีบริยงกระแสน้ำร่อง	42
รูปที่ 4.18 ลักษณะของกลีบเรียงกระแสน้ำร่องทั้ง 4 แบบที่ ก. Span 1.0 ข. Span 0.75 ค. Span 0.5.....	43
รูปที่ 4.19 การเกิดกระแสไหลวนที่ปลายใบของครีบริยงกระแสน้ำร่องเวอร์ชัน 3	44
รูปที่ 4.20 กราฟเปรียบเทียบอัตราการไหลกับประสิทธิภาพของครีบริยงกระแสน้ำ ทรงไฮโดรฟอยล์กับครีบริยงกระแสน้ำที่มีครีบริยงกระแสน้ำร่องเวอร์ชัน 1 และ 2	45
รูปที่ 4.21 กราฟเปรียบเทียบอัตราการไหลกับเสดของครีบริยงกระแสน้ำทรงไฮโดรฟอยล์กับ ครีบริยงกระแสน้ำที่มีครีบริยงกระแสน้ำร่องเวอร์ชัน 1 และ 2.....	45
รูปที่ 4.22 ทิศทางการเปลี่ยนตำแหน่งการติดตั้งครีบริยงกระแสน้ำร่องตามแนวแกน.....	46

รูปที่ 4.23 ทิศทางการเปลี่ยนตำแหน่งการติดตั้งครีบริยงกระแสน้ำรองตามแนวรัศมี	47
รูปที่ 4.24 ตำแหน่งการติดตั้งครีบริยงกระแสน้ำรองตามแนวรัศมีที่ A, B, C, D และ E.....	47
รูปที่ 5.1 ค่า degree of freedom for Student's t Distribution.....	54
รูปที่ 5.2 กราฟสมรรถนะการทำงานของเครื่องสูบน้ำที่ความเร็วรอบ 1450 รอบต่อวินาที (ก) $Q - H$ (ข) $Q - P_s$ (ค) $Q - \eta$	63
รูปที่ 5.3 กราฟสมรรถนะการทำงานของเครื่องสูบน้ำแบบไร้มิติ (Dimensionless) (ก) $\pi_Q - \pi_H$ (ข) $\pi_Q - \pi_P$ (ค) $\pi_Q - \eta$	65
รูปที่ 6.1 กราฟสมรรถนะการทำงานของเครื่องสูบน้ำที่ความเร็วรอบ 1450 รอบต่อวินาที (ก) $Q - H$ (ข) $Q - P_s$ (ค) $Q - \eta$ (ค่าจากผลการทดลองเพิ่มเติม).....	70
รูปที่ 6.2 กราฟสมรรถนะการทำงานของเครื่องสูบน้ำแบบไร้มิติ (Dimensionless) (ก) $\pi_Q - \pi_H$ (ข) $\pi_Q - \pi_P$ (ค) $\pi_Q - \eta$ (ค่าจากผลการทดลองเพิ่มเติม).....	71
รูปที่ ข.1 ผลการสอบเทียบของ Tachometer.....	85
รูปที่ ข.2 ผลการสอบเทียบของ Torque sensor.....	86
รูปที่ ข.3 ผลการสอบเทียบของ Electromagnetic flow meter.....	87
รูปที่ ข.4 ผลการสอบเทียบ Pressure transmitter.....	90

รายการสัญลักษณ์

A	=	Area, Cross Section, [m^2]
B	=	Number of Blades, [-]
D	=	Diameter of Impeller, [m]
g	=	Gravity, [m^2/s]
$H_{L,major}$	=	Head Loss Major [m]
$H_{L,minor}$	=	Head Loss Minor [m]
H_p	=	Total Head Pump [m]
LE	=	Leading Edge [degree]
N	=	Speed of Shaft, [rpm]
N_s	=	Specific Speed, [-]
P_{output}	=	Power Output, [kW]
P_{input}	=	Power input, [kW]
Q	=	Flow Rate, [m^3/s]
T_{shaft}	=	Torque of Shaft, [N-m]
TE	=	Trailing edge [degree]
ω	=	Angular Velocity, [s^{-1}]
ρ	=	Density, [kg/m^3]
η	=	Pump Efficiency, [-]
π_H	=	Head Coefficient, [-]
π_p	=	Power Coefficient [-]
π_Q	=	Flow Coefficient [-]

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันประเทศไทยมีการใช้เครื่องสูบน้ำพญานาคกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากประชากรส่วนใหญ่ในประเทศประกอบอาชีพเกษตรกรรม และเครื่องสูบน้ำพญานาคมีราคาถูก ดูแลรักษาง่าย อีกทั้งยังง่ายต่อการเคลื่อนย้ายและติดตั้ง และมีการนำเอาเครื่องสูบน้ำพญานาคไปใช้ในการระบายน้ำในช่วงภัยพิบัติน้ำท่วมอีกด้วย แต่ปัจจุบันเครื่องสูบน้ำยังไม่ได้มีการทดสอบที่ได้มาตรฐานและจากการศึกษาวิจัยเรื่อง โครงการพัฒนาชุดทดสอบสมรรถนะและการปรับปรุงประสิทธิภาพชุดใบพัดสำหรับเครื่องสูบน้ำพญานาค ที่ได้ทำวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบและสร้างชุดทดสอบที่ได้มาตรฐานสำหรับการทดสอบหาสมรรถนะการทำงานของเครื่องสูบน้ำ และทำการทดสอบหาสมรรถนะของเครื่องสูบน้ำพญานาคของแต่ละบริษัทที่ร่วมในโครงการ อีกทั้งยังมีการออกแบบใบพัด และครีบริยงกระแสน้ำต้นแบบ เพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำให้กับแต่ละบริษัท และทดสอบประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นจริงในห้องปฏิบัติการและการทดสอบภาคสนาม ซึ่งโครงการวิจัยดังกล่าวได้ดำเนินการมาถึงระยะที่ 2 แล้ว ซึ่งขณะนี้จะอยู่ในช่วงของการดำเนินการสร้างและขึ้นรูปใบพัด ครีบริยงกระแสน้ำ และบ่อทดสอบ ในงานวิจัยดังกล่าวยังมีส่วนที่สามารถเสนอแนวทางการปรับปรุงเพิ่มเติมเพื่อให้เครื่องสูบน้ำมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นได้ โดยการเปลี่ยนลักษณะตัวครีบริยงกระแสน้ำ และครีบริยงกระแสน้ำรอง ให้เป็นรูปไฮโดรฟอยล์ จากเหตุผลดังกล่าว จึงได้เกิดเป็นโครงการวิจัยชื่อว่า “การทดสอบสมรรถนะและแนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำแบบไหลตามแนวแกน” โดยในระยะแรกของโครงการดังกล่าว ทีมวิจัยได้ทำการออกแบบใบพัดและครีบริยงกระแสน้ำเรียบร้อยแล้ว และในระยะที่ 2 จะทำการทดสอบสมรรถนะเครื่องสูบน้ำพญานาคของงานวิจัยข้างต้นไปทดสอบจริงในภาคสนาม เพื่อบันทึกผลและวิเคราะห์ประสิทธิภาพที่ได้ และเสนอแนวทางในการปรับปรุงเพื่อให้เครื่องสูบน้ำมีประสิทธิภาพสูงขึ้น สำหรับเป็นแนวทางในการปรับปรุงต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 ร่วมออกแบบบ่อทดสอบสมรรถนะ (รุ่นทดสอบภาคสนาม) ของเครื่องสูบน้ำ
- 1.2.2 เพื่อให้ได้ลักษณะการทำงานของเครื่องสูบน้ำ
- 1.2.3 เพื่อเสนอแนวทางปรับปรุงรูปทรงครีบริยงกระแสน้ำให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

ชุดใบพัดที่นำไปทดสอบจริงที่ภาคสนามได้ประสิทธิภาพใกล้เคียงกับผลจากแบบจำลองที่ได้จากโปรแกรม Ansys CFX และการเปลี่ยนลักษณะตัวครีบริบเรียงกระแสนี้ให้เป็นรูปไฮโดรฟอยล์ และการติดครีบริบเรียงกระแสนี้จะทำให้ประสิทธิภาพของชุดใบพัดเพิ่มขึ้น

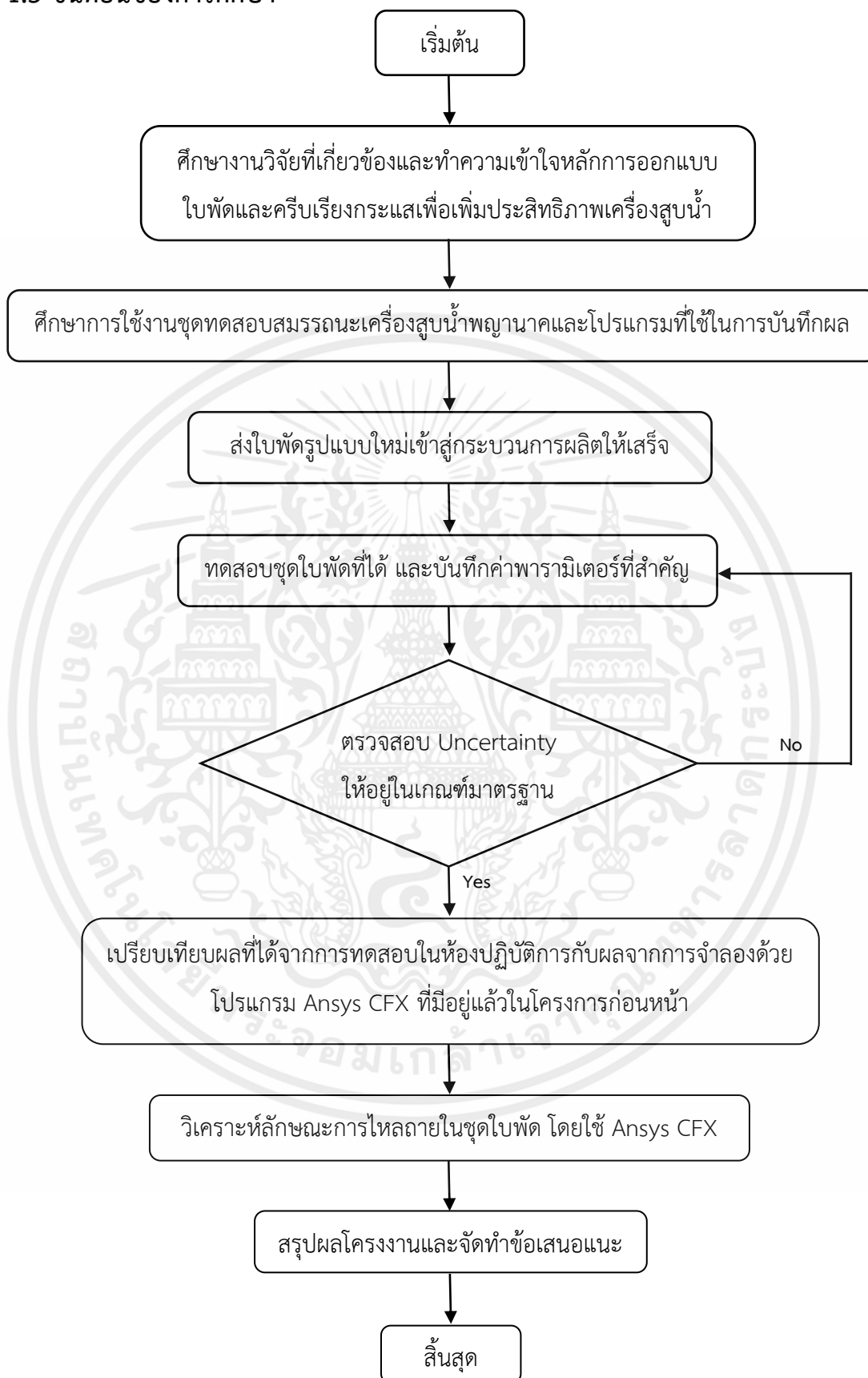
1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ร่วมออกแบบการทดสอบสมรรถนะเครื่องสูบน้ำร่วมกับนักวิจัยภายใต้โครงการที่ได้รับทุนสนับสนุนจาก สวทช.

1.4.2 ทดสอบใบพัดของเครื่องสูบน้ำแบบไหลตามแนวแกน บันทึกผลการทดสอบและคำนวณความไม่แน่นอนโดยรวมของการทดสอบแต่ละครั้ง

1.4.3 ใช้โปรแกรม Ansys CFX เพื่อจำลองการไหลของของไหลและปรับปรุงครีบริบเรียงกระแสนี้

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา



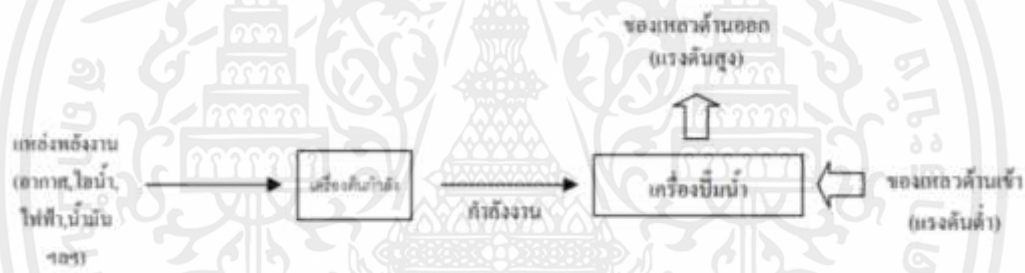
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความหมายของเครื่องสูบน้ำ

เครื่องสูบน้ำ (Water pump) คืออุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเคลื่อนย้ายของเหลวจากตำแหน่งหนึ่งไปสู่อีกตำแหน่งหนึ่งที่มีระยะทางไกลออกไปหรืออยู่คนละระดับความสูง โดยเครื่องสูบน้ำจะช่วยเพิ่มพลังงานให้กับของไหล เพื่อให้ของไหลจากจุดที่มีความดันเฮดต่ำ (Low pressure head) ไหลผ่านระบบท่อด้วยความดันเฮดที่สูงขึ้นกว่าเดิม (High pressure head) โดยใบพัดของเครื่องสูบน้ำจะเป็นตัวที่ทำให้ของไหลมีพลังงานมากขึ้นและสามารถเอาชนะความต้านทานต่อการไหลภายในระบบได้



รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงพลังงานจากต้นกำลังไปเป็นการเพิ่มแรงดันให้แก่ของไหล [1]

2.2 การจำแนกประเภทเครื่องสูบน้ำ

เครื่องสูบน้ำ (Water pump) ในปัจจุบันมีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในลักษณะต่างๆตามการใช้งาน ทำให้เครื่องสูบน้ำมีชื่อเรียกและลักษณะรูปร่างหลายรูปแบบ โดยได้มีการแบ่งแยกประเภทและจัดหมวดหมู่ให้กับเครื่องสูบน้ำตามการใช้งานในลักษณะต่างๆ สามารถแบ่งได้ 2 แบบ คือ แบ่งตามลักษณะการเพิ่มพลังงานให้กับของไหล และแบ่งตามลักษณะการขับเคลื่อนของไหลในเครื่องสูบ

2.2.1 แบ่งตามลักษณะการเพิ่มพลังงานให้กับของไหล

แบ่งตามลักษณะการเพิ่มพลังงานให้กับของไหล หรือการไหลของของไหลในเครื่องสูบน้ำ สามารถแยกประเภทเครื่องสูบน้ำได้เป็น 4 ประเภท ได้แก่

1. ประเภทแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Pump) หรือบางครั้งเรียกว่าเป็นแบบ Roto - dynamic เป็นเครื่องสูบน้ำที่เพิ่มพลังงานให้กับของไหลโดยใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง

2. ประเภทโรตารี (Rotary Pump) เป็นเครื่องสูบน้ำที่เพิ่มพลังงานให้กับของไหลโดยใช้การหมุนของฟันเฟืองรอบแกนกลาง

3. ประเภทลูกสูบชัก (Reciprocating Pump) เป็นเครื่องสูบน้ำที่เพิ่มพลังให้กับของไหลโดยใช้การอัดโดยตรงในกระบอกสูบ

4. แบบพิเศษ (Special Pump) เป็นเครื่องสูบน้ำที่มีลักษณะพิเศษที่ไม่สามารถจัดอยู่ในสามประเภทก่อนหน้านี้ได้

2.2.2 แบ่งตามลักษณะการขับเคลื่อนของไหลในเครื่องสูบน้ำ

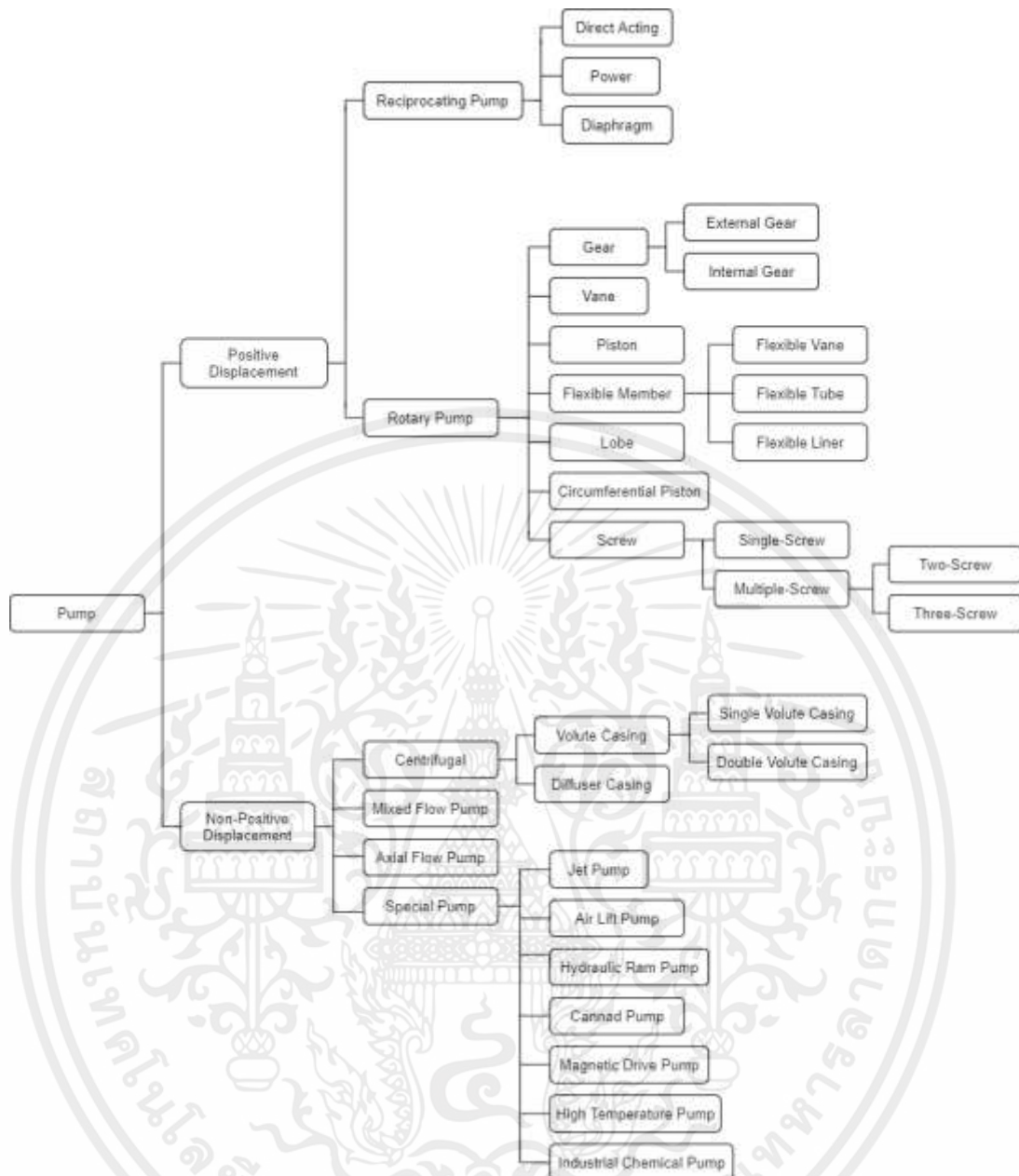
แบ่งตามลักษณะการขับเคลื่อนของไหลในเครื่องสูบน้ำสามารถแยกประเภทเครื่องสูบน้ำได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

2.2.2.1 ปริมาตรแทนที่เชิงบวก หรือแทนที่โดยตรง (Positive Displacement)

เครื่องสูบน้ำประเภทปริมาตรแทนที่เชิงบวก คือ เครื่องสูบน้ำประเภทที่มีการถ่ายเทพลังงานให้กับของไหลแบบไม่ต่อเนื่อง ทำงานโดยอาศัยหลักการแทนที่ของของไหลจากการดูดของไหลเข้าไปในพื้นที่ปิด แล้วลดปริมาตรของพื้นที่นั้นให้เล็กลงเพื่อให้ความดันเพิ่มขึ้น เครื่องสูบน้ำประเภทนี้เหมาะสำหรับสูบของไหลที่มีปริมาตรไม่มากแต่ต้องการเฮดในระบบที่สูง โดยเครื่องสูบน้ำที่จัดอยู่ในประเภทนี้ คือ แบบโรตารี (Rotary) และแบบลูกสูบ (Reciprocating) เข้ามาอยู่ในกลุ่มนี้

2.2.2.2 ปริมาตรแทนที่ไม่เชิงบวก (Non-positive Displacement)

เครื่องสูบน้ำประเภทปริมาตรแทนที่ไม่เชิงบวก หรือไคเนติก (Kinetic) คือ เครื่องสูบน้ำประเภทที่มีการถ่ายเทพลังงานให้กับของไหลอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้นโดยใช้ใบพัดที่หมุนด้วยความเร็วสูงส่งพลังงานเข้าสู่ของไหล โดยเครื่องสูบน้ำที่จัดอยู่ในประเภทนี้ คือ แบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Pump) แบบไหลผสม (Mixed Flow Pump) แบบไหลตามแนวแกน (Axial Flow Pump) และแบบพิเศษ (Special Pump)



รูปที่ 2.2 การแบ่งประเภทของเครื่องสูบน้ำตามลักษณะการขับเคลื่อนของไหล [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์เครื่องสูบน้ำ

2.3.1 ประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำ (Pump performance)

การออกแบบเครื่องสูบน้ำเพื่อให้ทำงานได้โดยเกิดประโยชน์สูงสุด ต้องพิจารณาถึงกำลังงานและประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำ กำลังงานที่ใช้ในการขับเครื่องสูบน้ำจะต้องได้จากการพิจารณาด้านพลศาสตร์ของไหล และพลังงานที่สูญเสียไปจากการไหลของของไหลในระบบ มีปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำ (η) อาทิเช่น เฮดจำเพาะ (Specific Head), ลักษณะของใบพัด, ลักษณะการกระจายตัวของของไหลในช่องทางไหล เป็นต้น ค่าประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1

$$\eta = \frac{P_{\text{output}}}{P_{\text{input}}} \quad (2.1)$$

งานที่ทำโดยเครื่องสูบน้ำถูกแสดงในฟังก์ชันของเฮดความดันรวม (Total Head) และน้ำหนักรวมของของไหลที่ถูกสูบคือ กำลังงานที่ป้อนให้กับของไหลจะเป็นกำลังที่ใช้ในการผลักดันของไหล เรียกว่า Power Output สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.2

$$P_{\text{output}} = \rho \times g \times Q \times H_p \quad (2.2)$$

การทำงานของเครื่องสูบน้ำจะต้องใช้พลังงานจากภายนอกเป็นแหล่งต้นกำลัง เช่น มอเตอร์ไฟฟ้าหรือเครื่องยนต์ ซึ่งกำลังงานของต้นกำลังที่ได้จากมอเตอร์ที่ขับเครื่องสูบน้ำนั้น เรียกว่า Power Input สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.3

$$P_{\text{input}} = T_{\text{shaft}} \times \omega \quad (2.3)$$

เมื่อ P_{output} = กำลังที่ใช้ในการผลักดันของไหล, วัตต์

P_{input} = กำลังที่ใช้ในการขับมอเตอร์

T_{shaft} = แรงบิด \times ความเร็วเชิงมุม

ρ = ความหนาแน่นของของไหล

H_p = เฮดความดัน

Q = อัตราการไหลของของไหลที่ไหลผ่านท่อ

ω = ความเร็วเชิงมุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 สัมประสิทธิ์ของการไหล (Flow coefficient)

สัมประสิทธิ์ของการไหล (Flow coefficient) คือ ค่าคงที่ของการไหลที่ใช้สำหรับใบพัดทุกชนิด ซึ่งอธิบายถึงอัตราการไหลของของไหลเมื่อออกจากเครื่องสูบน้ำที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหล (Q) เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบสำหรับเครื่องสูบน้ำประเภทอื่นได้ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล (π_Q) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.4 เมื่อ N , D เป็นค่าคงที่ และ B เป็นจำนวนใบพัด

$$\pi_Q = \frac{Q}{(ND^3)/B^{0.5}} \quad (2.4)$$

2.3.3 สัมประสิทธิ์ของเฮด (Head coefficient)

เฮด คือ ความดันของไหล ที่จุดใดจุดหนึ่ง เป็นเทอมซึ่งแสดงอยู่ในรูปของความสูง เมื่อนำมาใช้กับระบบเครื่องสูบน้ำ จะเรียกว่า เฮดของเครื่องสูบน้ำ (Pump Head) ในเทอมของเฮด (Head) จะหมายถึงผลต่างของระดับทางด้านดูด (Suction Level) กับระดับทางด้านจ่าย (Discharge Level) ของของไหลในขณะที่เครื่องสูบน้ำกำลังทำงาน ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ของเฮด (π_H) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.5 เมื่อ B เป็นจำนวนใบพัด

$$\pi_H = \frac{gH_p}{(ND)^2/B} \quad (2.5)$$

2.3.4 สัมประสิทธิ์ของกำลัง (Power coefficient)

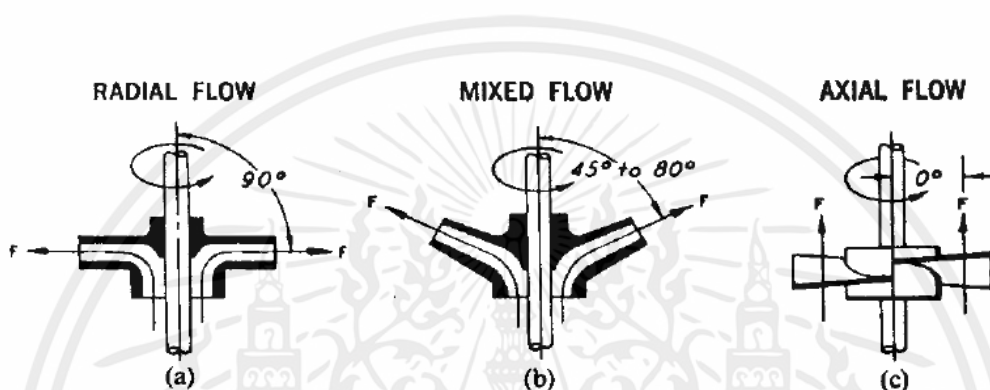
สัมประสิทธิ์ของกำลัง คือ ค่าที่แสดงถึงกำลังที่เครื่องสูบน้ำต้องการใช้งาน ซึ่งแสดงได้ในรูปแบบของตัวแปรไร้มิติ ตามสมการที่ 2.6 โดยสามารถนำไปใช้เปรียบเทียบกับเครื่องสูบน้ำประเภทอื่นได้ เมื่อตัวแปร N , D เป็นค่าคงที่ และ B เป็นจำนวนใบพัด

$$\pi_p = \frac{P}{\rho N^3 D^5 / B^{1.5}} \quad (2.6)$$

2.3.5 ความเร็วจำเพาะ (Specific speed)

ค่าความเร็วจำเพาะ คือ ค่าที่แสดงถึงลักษณะของใบพัด โดยสามารถคำนวณได้ในจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด (BEP) เท่านั้น เพื่อบ่งบอกถึงคุณลักษณะของใบพัดดังแสดงในรูปที่ 2.3 ว่าเป็น Centrifugal pump แบบใดโดยสามารถคำนวณได้ดังนี้

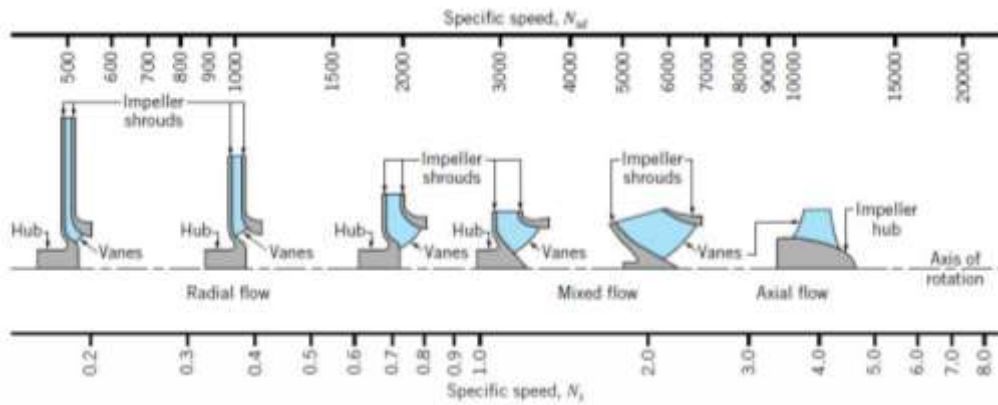
$$N_s = \frac{NQ^{0.5}}{(gH_p)^{0.75}} \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.3 ทิศทางการไหลของของไหลออกจากใบพัด [2]

- (a) ในแนวรัศมี
- (b) ในแนวทำมุมเอียงกับเพลา
- (c) ในแนวขนานกับเพลา

ลักษณะของใบพัดสามารถรู้ได้จากการคำนวณค่าความเร็วจำเพาะจากสมการที่ 2.7 จะเห็นว่าเครื่องสูบน้ำที่มีอัตราไหลสูงและมีเฮดต่ำ เช่น Axial flow pump ค่าจะมีค่า N_s มาก และเครื่องสูบน้ำที่มีอัตราไหลต่ำและมีเฮดสูง เช่น Radial flow pump ค่าจะมีค่า N_s น้อย ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.4 ทำให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วจำเพาะกับลักษณะของใบพัด เมื่อเปลี่ยนความเร็วรอบของเครื่องสูบน้ำ ทั้งอัตราไหลและเฮดจะเปลี่ยนไป แต่ค่า N_s จะยังคงเป็นค่าคงที่อยู่



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วจำเพาะกับลักษณะใบพัด [3]

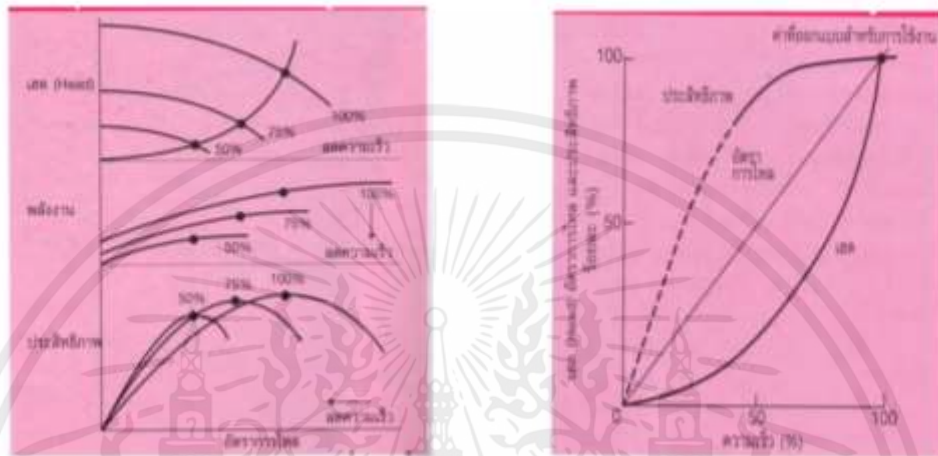
ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของลักษณะใบพัดกับความเร็วจำเพาะ [3]

Type	N_s	Head (m)	
		Horizontal Mounting	Vertical Mounting
Radial flow	<1,000	Single stage 10-150 Multi stage >50	Single stage 10-200 Multi stage >10
Mixed flow	4,000-10,000	4-15	Single stage 4-60 Multi stage >10
Axial flow	>10,000	>6	<8

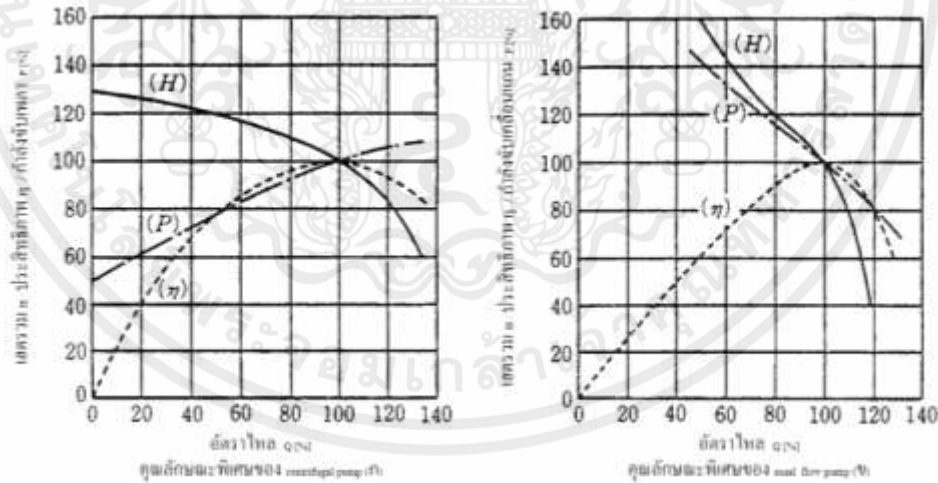
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำ

สภาวะในการใช้งานของเครื่องสูบน้ำมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำ โดยในทางทฤษฎีนั้นค่าประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำจะขึ้นอยู่กับตัวแปรสำคัญต่างๆ ได้แก่ อัตราการไหล ความเร็วรอบ และเสต ตัวอย่างลักษณะของความสัมพันธ์ของตัวแปรแสดงดังรูปที่ 2.5 และรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำกับความเร็รรอบ อัตราการไหล และเสต [1]



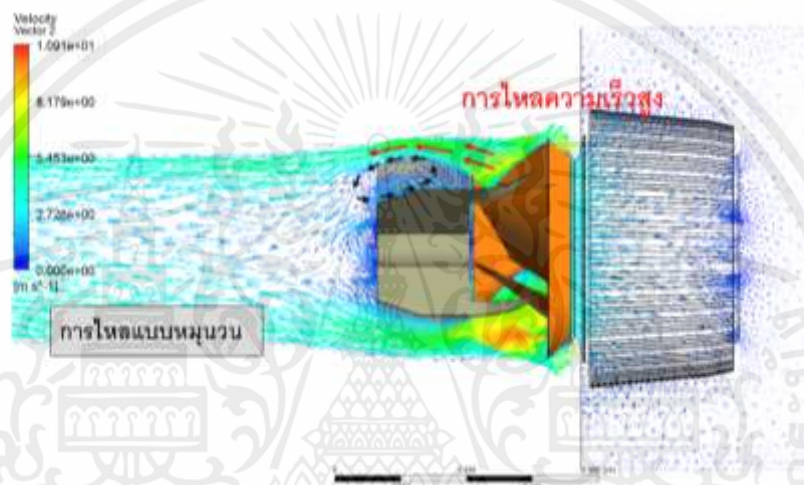
รูปที่ 2.6 คุณลักษณะของเครื่องสูบน้ำแบบเหวี่ยงหนีจุดศูนย์กลางกับแบบไหลตามแนวแกน [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

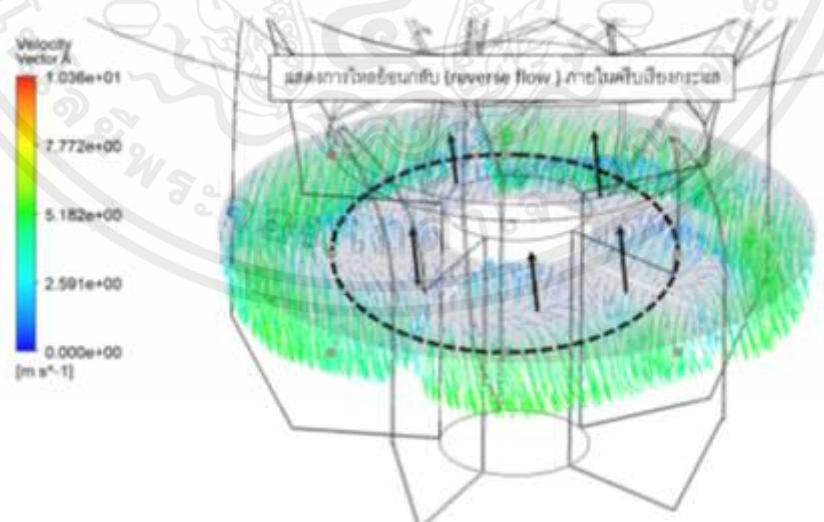
2.5 รูปแบบสนามการไหลโดยทั่วไปของเครื่องสูบน้ำพญานาคที่ใช้งานในประเทศไทย

2.5.1 การไหลแบบหมุนวน (Recirculation flow) [4]

ภายในช่องทางการไหลพบว่าเกิดการไหลแบบหมุนวน บริเวณถัดจากใบพัดอันเนื่องมาจากพื้นที่หน้าตัดการไหลมีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจากไหลออกจากใบพัด ดังแสดงในรูปที่ 2.7 และรูปที่ 2.8 ซึ่งพบการไหลเฉือนระหว่างกระแสการไหลความเร็วสูงที่ออกมาจากด้านหลังใบพัด และกระแสการไหลวกกลับของการไหลแบบหมุนวนบริเวณหลังใบพัด ส่งผลให้เกิดการสูญเสียความดันสุทธิเนื่องจากแรงเสียดทานการไหลระหว่างเนื้อของไหลด้วยกัน



รูปที่ 2.7 การไหลแบบหมุนวน (แนวลูกศรสีดำ) [4]

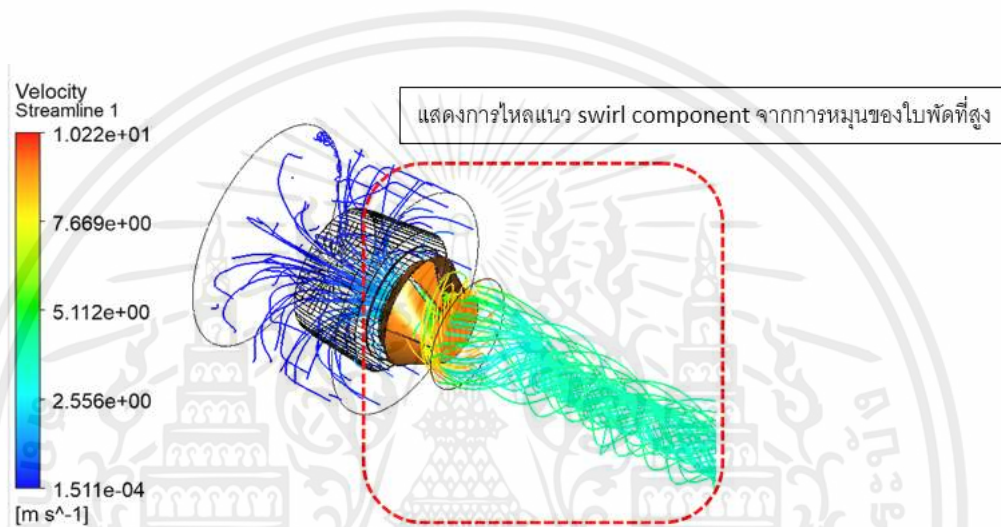


รูปที่ 2.8 การไหลแบบหมุนวนภายในช่องการไหลบริเวณครีบริยงกระแส [4]

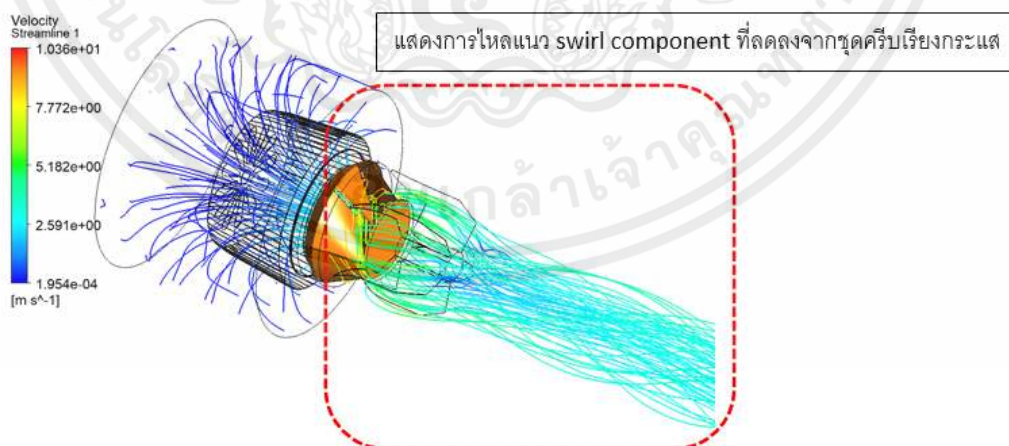
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 การไหลแบบหมุนควง (Swirl flow) [4]

พบการไหลแบบหมุนควง (Swirl Flow) ตลอดแนวของท่อลำเลียงการไหลดังแสดงในรูปที่ 2.9 และบริเวณcribเรียงกระแสด้านหลังใบพัดดังแสดงในรูปที่ 2.10 เนื่องจากcribเรียงกระแสไม่ได้ทำมุมอยู่ในแนวเดียวกันกับน้ำที่ไหลออกมาจากใบพัด จึงส่งผลให้กระแสน้ำมีการเปลี่ยนทิศทางกระทันหัน และรูปทรงของcribเรียงกระแสที่ไม่สอดคล้องต่อความเร็วและทิศทางการไหลที่มาจากใบพัดจึงทำให้พบการไหลแบบหมุนควง และการไหลแบบหมุนวน ที่บริเวณcribเรียงกระแสด้านหลังใบพัด



รูปที่ 2.9 การไหลแบบหมุนควงจากการจำลองการไหลของใบพัด
ที่ไม่ได้ติดตั้งcribเรียงกระแส [4]



รูปที่ 2.10 การไหลแบบหมุนควง จากการจำลองการไหลของใบพัดที่ติดตั้งcribเรียงกระแส [4]

2.6 กฎความคล้ายของเครื่องสูบน้ำ (Affinity Laws)

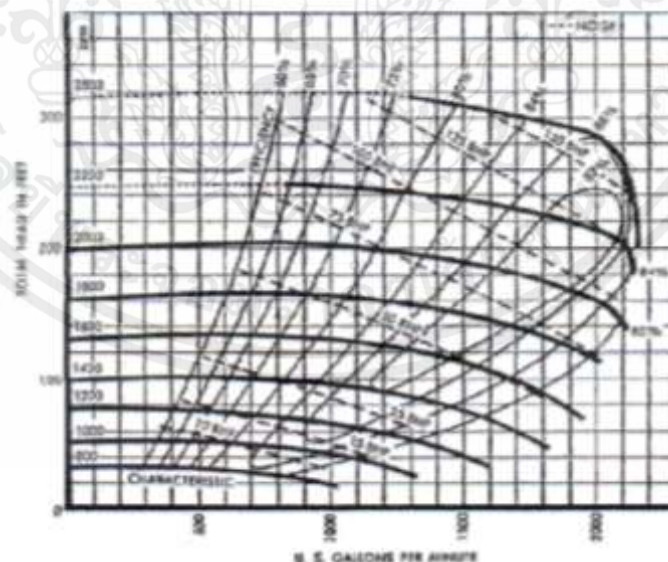
กฎความคล้ายของเครื่องสูบน้ำ จะแสดงค่าอัตราการสูบ เฮดรวมของเครื่องสูบ และกำลังขับของเครื่องสูบที่เปลี่ยนแปลงไปตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด หรือค่าความเร็วรอบของใบพัด ในกรณีที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัดมีค่าคงที่แต่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ จะถือว่าประสิทธิภาพการทำงานจะไม่เปลี่ยนไปตามความเร็วรอบที่เปลี่ยนไป ข้อสมมุตินี้จะใกล้เคียงกับความ เป็นจริงเมื่อความเร็วรอบเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 25% ของความเร็วรอบที่ออกแบบไว้ ซึ่งแสดง ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.8 ถึง 2.10

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.8)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad (2.9)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3 \quad (2.10)$$

เมื่อความเร็วรอบของใบพัดเปลี่ยนแปลงไป กราฟ H-Q จะยังคงรูปร่างลักษณะของเส้น แบบเดิมแต่ค่าเฮดจะเลื่อนสูงขึ้นหรือเลื่อนต่ำลงดังแสดงในรูปที่ 2.11

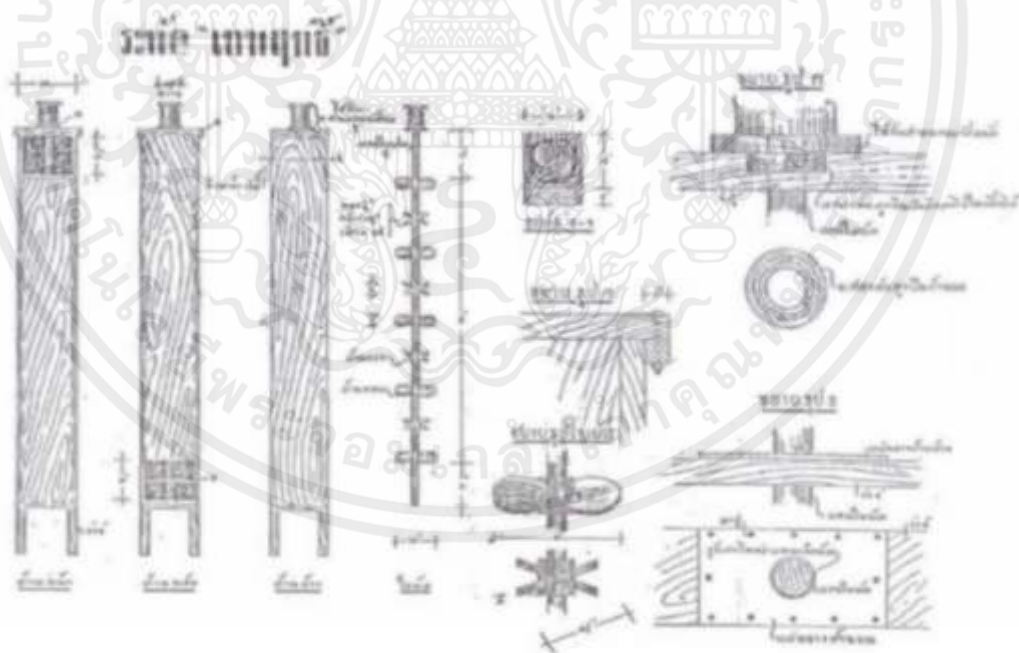


รูปที่ 2.11 ตัวอย่างสมรรถนะของเครื่องสูบน้ำเมื่อความเร็วการหมุนของใบพัดเปลี่ยนไป [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ท่อสูบน้ำพญานาคเป็นเครื่องสูบน้ำแบบไหลตามแกนเพลลา (Axial Flow Pump) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ท่อสูบน้ำเทพฤทธิ เริ่มมีการผลิตในประเทศตั้งแต่ปี พ.ศ. 2502 ผู้คิดค้นคนแรกคือ หม่อมราชวงศ์ เทพฤทธิ เทวกุล ได้ตั้งชื่อว่า “ระหัดเทพฤทธิ” [5] ซึ่งประสบความสำเร็จในการวิจัยท่อสูบน้ำที่เคลื่อนตามแกนเพลลาแบบง่าย ๆ แต่ประสิทธิภาพเหมาะสมกับสภาพการทำงานในประเทศไทย จึงเป็นที่ยอมรับของเกษตรกรอย่างกว้างขวาง ท่อสูบน้ำ “เทพฤทธิ” กล่าวได้ว่าเป็นการประดิษฐ์คิดค้นและพัฒนาโดยคนไทยเป็นเครื่องแรกในทวีปเอเชีย W. CHINSUWAN [6] โดยในรายงานได้กล่าวว่า มรว. เทพฤทธิ เทวกุล ได้เริ่มวิจัยเพื่อพัฒนาท่อสูบน้ำโดยแรกเริ่มทำจากไม้ ดังรูปที่ 2.12 เพื่อให้เกษตรกรสามารถผลิตใช้ได้เอง แต่เนื่องด้วยยังมีประสิทธิภาพต่ำ จึงไม่เป็นที่นิยมนัก ต่อมาได้พัฒนาจากระหัดรางไม้วิดน้ำแบบเปิดมาเป็นแบบปิด ขับเคลื่อนระหัดด้วยเครื่องยนต์ ทำให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และมีชื่อเรียกว่า “ระหัดเทพฤทธิ” จนถึงปี พ.ศ.2498 ระหัดเทพฤทธิ [5] ได้ถูกพัฒนาจากแบบเดิมที่ทำด้วยไม้เปลี่ยนมาเป็นโลหะ และตั้งชื่อใหม่เป็น “ระหัดเหล็กเทพฤทธิ” โดยเปลี่ยนจากรางระหัดไม้มาเป็นเหล็กแผ่นม้วนเป็นท่อ ใช้ใบพัดเป็นอะลูมิเนียม โดยมีใบพัดตั้งแต่ขนาด 25 จนถึง 33 เซนติเมตร โดยใช้เครื่องยนต์รถไถเดินตามเป็นต้นกำลัง รูปที่ 2.13



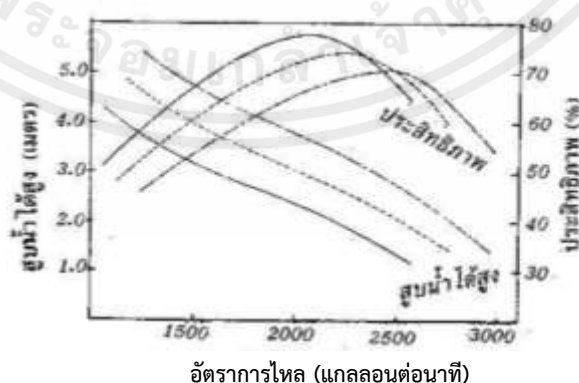
รูปที่ 2.12 ระหัดไม้ "เทพฤทธิ" [5]

ในปี พ.ศ. 2509 ได้มีบริษัทเอกชนลอกเลียนแบบนำไปผลิตและออกจำหน่ายไม่ต่ำกว่า 6 บริษัท และได้มีการดัดแปลงจากใบพัด 2 แฉก เป็น 3 แฉก และมีการขยายการผลิตจำหน่ายมากกว่า 40 ปี และใช้งานอย่างกว้างขวางมาจนถึงปัจจุบัน [5]



รูปที่ 2.13 มรว.เทพฤทธิ์ เทวกุล ในการสาธิตเผยแพร่ท่อสูบน้ำ "เทพฤทธิ์" ขับเคลื่อนด้วยรถแทรกเตอร์ควายเหล็ก [5]

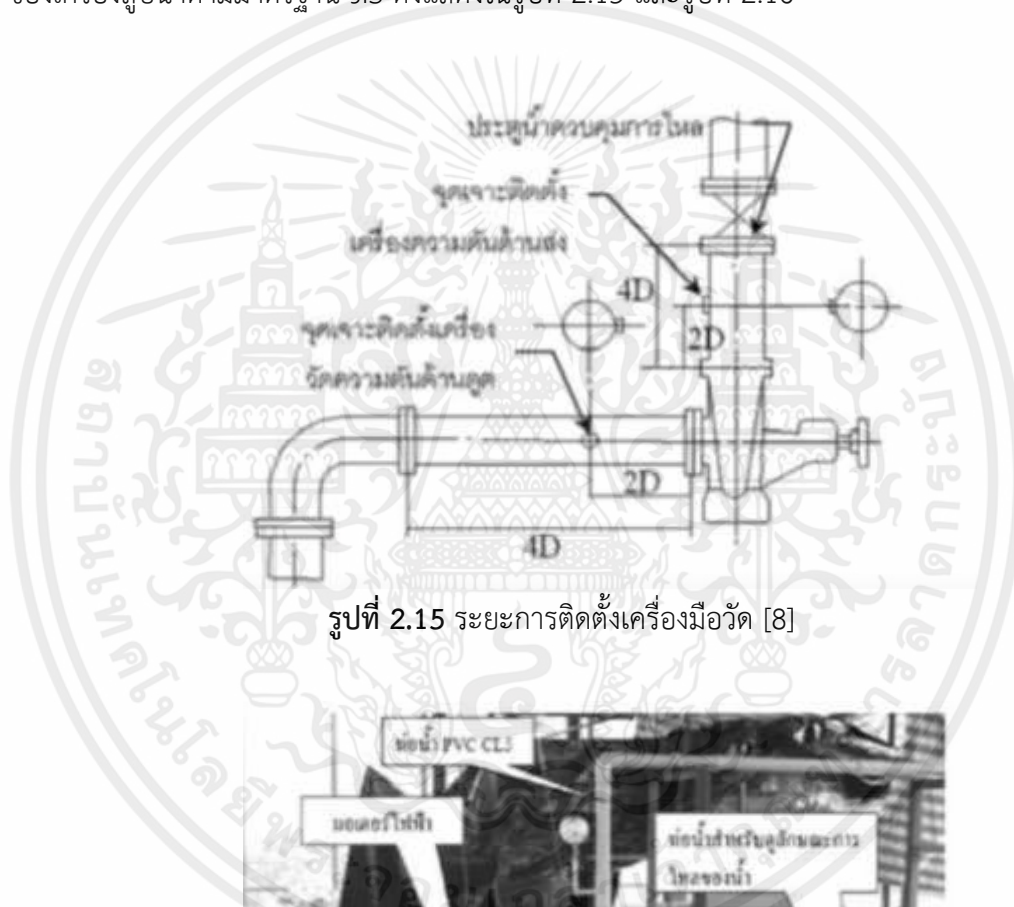
บัญญัติ เศรษฐฐิติ [7] ระหัดเทพฤทธิ์ เหมาะสำหรับสูบน้ำจากแหล่งน้ำที่อยู่ต่ำขึ้นมาใช้งาน ซึ่งระดับน้ำที่จะสูบขึ้นมากับฝั่งต้องห่างไม่เกิน 1 - 4 เมตร ถ้าห่างมากกว่านี้จะสูบน้ำได้น้อย ไม่คุ้มค่ากับการลงทุน ระหัดเทพฤทธิ์จึงเป็นที่นิยมอย่างมากในการสูบน้ำเข้านาข้าว เมื่อเกษตรกรต้องการที่จะเลือกซื้อระหัดเทพฤทธิ์ เกษตรกรจะต้องรู้ว่าต้องการจะสูบน้ำขึ้นมาใช้ในอัตราเท่าไร กล่าวคือเกษตรกรควรรู้จักเส้นกราฟสมรรถนะของเครื่องสูบน้ำเสียก่อน รูปที่ 2.14 ซึ่งจะทำให้เกษตรกรเข้าใจเครื่องสูบน้ำนั้นมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 2.14 เส้นกราฟแสดงสมรรถนะของระหัดเทพฤทธิ์ [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จิรวัดน์ โภคานิตย์ และ พิชัย กฤษไมตรี [8] งานวิจัยนี้แสดงการออกแบบและทดสอบปั๊มกันหอย โดยใช้ข้อกำหนดตามวิธีการทดสอบของมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น (JIS B 8301) ในการทดสอบจะใช้ค่าความเร็วรอบที่ 675 750 825 900 975 และ 1,050 รอบต่อนาที ผลที่ได้จากการทดสอบพบว่า ประสิทธิภาพ ความดัน และอัตราการไหลของปั๊มกันหอยจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบการหมุนของมอเตอร์ ซึ่งได้ค่าประสิทธิภาพสูงสุด 22.66 เปอร์เซ็นต์ อัตราการไหล 195 ลิตรต่อนาที และความดันที่ 9 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่ความเร็วสูงสุดที่ใช้ทดสอบคือ 1,050 รอบต่อนาที สำหรับวิธีการทดสอบเครื่องสูบน้ำจะทดสอบตามมาตรฐาน JIS B 8301 จึงมีการสร้างชุดทดสอบสมรรถนะของเครื่องสูบน้ำตามมาตรฐาน JIS ดังแสดงในรูปที่ 2.15 และรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.15 ระยะเวลาติดตั้งเครื่องมือวัด [8]



รูปที่ 2.16 รายละเอียดการติดตั้งอุปกรณ์เครื่องมือวัดตามมาตรฐาน JIS B 8301 [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 เกณฑ์การออกแบบพัฒนาชุดทดสอบ

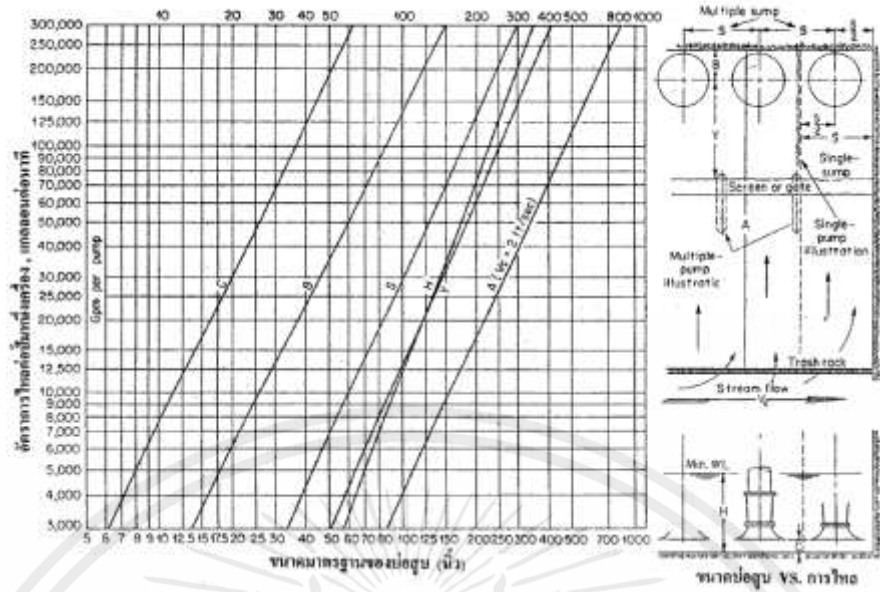
3.1.1 หลักในการสร้างและเกณฑ์การออกแบบบ่อสูบ

ในการทดสอบหาประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำ การออกแบบบ่อทดสอบให้เหมาะสมนั้นถือว่ามีความสำคัญเป็นอย่างมาก เพื่อให้ของเหลวสามารถไหลเข้าสู่ปลายท่อดูดได้อย่างสม่ำเสมอไม่เกิดความปั่นป่วนในการไหล และนำอากาศเข้าไปไหลปนจนส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อตัวเครื่องสูบน้ำ

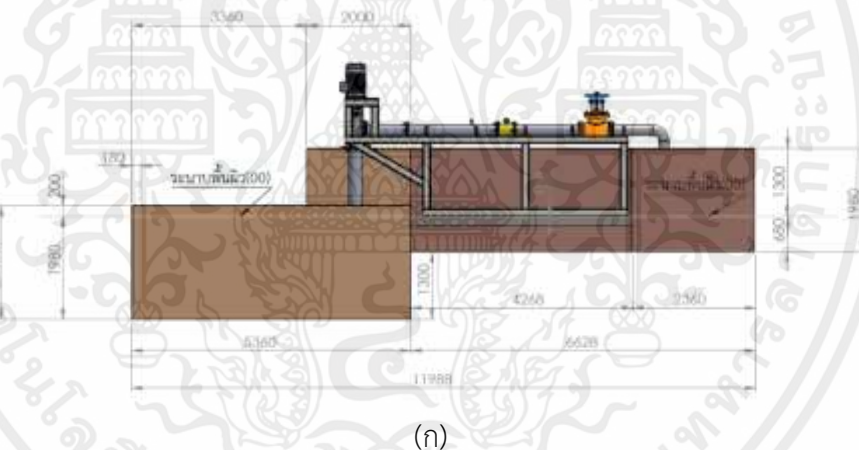
จากเงื่อนไขการออกแบบเครื่องสูบน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 นิ้ว ที่อัตราการไหลไม่ต่ำกว่า 9000 ลิตรต่อนาที หรือประมาณ 2,377 แกลลอนต่อนาที ซึ่งเป็นเงื่อนไขขั้นต่ำของการออกแบบ แต่จากวิธีการทาง CFD พบว่าที่อัตราการไหล 13,000 ลิตรต่อนาที หรือ 3434.24 แกลลอนต่อนาที นั้นมีประสิทธิภาพสูงสุด จึงได้มีการออกแบบให้ครอบคลุมย่านอัตราการไหลนี้ โดยอ้างอิงจากแผนภูมิแสดงเกณฑ์การออกแบบบ่อสูบของ Hydraulic Institute ประเทศสหรัฐอเมริกา จากรูปที่ 3.1 และสามารถกำหนดรายละเอียดได้ดังนี้

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดขั้นต่ำในการออกแบบบ่อสูบ

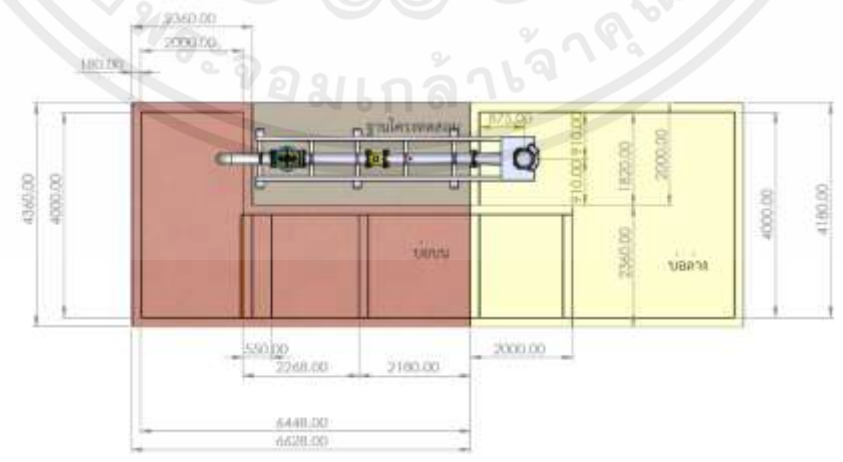
รายละเอียด	ความยาว (นิ้ว)	ความยาว (เมตร)
ความลึกของน้ำในบ่อสูบ (H)	60	1.5240
ความสูงของปลายท่อดูดจากพื้นบ่อสูบ (C)	6.5	0.1651
ปลายท่อดูดต้องอยู่ต่ำกว่าระดับผิวน้ำไม่น้อยกว่า (H-C)	53.5	1.3589
ระยะจากศูนย์กลางท่อดูดถึงกำแพงบ่อสูบ (B)	14.25	0.3620
ความกว้างของบ่อสูบต่ำสุด (S)	36	0.9144
ความยาวของบ่อสูบต่ำสุด (A)	85	2.1590



รูปที่ 3.1 ขนาดมาตรฐานของบ่อสูบสำหรับเครื่องสูบน้ำ 3,000 ถึง 300,000 แกลลอนต่อนาที [2]



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.2 (ก) และ (ข) แสดงแผนภาพของชุดทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

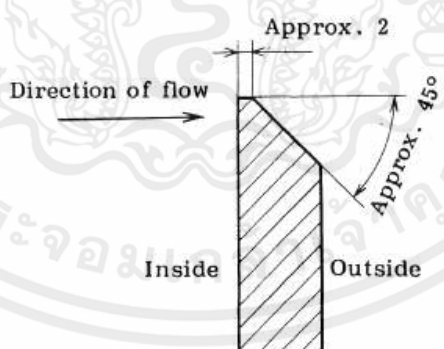
3.1.2 เกณฑ์การออกแบบฝาย (Weir) ช่องทางน้ำและตะแกรงกันกระเพื่อม

เมื่อเครื่องสูบน้ำทำการสูบน้ำจากบ่อสูบมายังบ่อจ่าย ในการที่จะทำให้เกิดการใช้น้ำหมุนเวียนภายในบ่อทดสอบนั้น จำเป็นจะต้องมีช่องทางน้ำเพื่อส่งน้ำในบ่อจ่ายกลับไปยังบ่อสูบ แต่ในการส่งน้ำกลับไปยังบ่อสูบนั้นจะต้องไม่ทำให้เกิดความปั่นป่วนในการไหลของน้ำในบ่อสูบ จึงต้องมีฝายเพื่อทำหน้าที่ในการชะลอน้ำและทำให้น้ำไหลกลับไปยังบ่อสูบในรูปการไหลแบบคงตัว (Laminar flow) อีกทั้งยังทำหน้าที่ในการวัดปริมาณน้ำ เพื่อที่จะนำไปสอบเทียบกับอุปกรณ์

3.1.2.1 ฝายสันคมรูปสามเหลี่ยม (V-notch sharp-crested weirs)

ฝายสันคมรูปสามเหลี่ยมนั้นมีการนิยมใช้กันอย่างมาก เพราะช่วยลดข้อจำกัดหรือปัญหาจากการใช้ฝายรูปสี่เหลี่ยมได้ โดยมีลักษณะเฉพาะคือ จะมีการลบมุมที่สันคมทางด้านท้ายน้ำ 60° และระดับน้ำด้านท้ายต่ำกว่าจุดยอดของสันฝาย เพื่อไม่ให้เกิดอิทธิพลต่อการไหล ซึ่งในการออกแบบให้เป็นไปตามมาตรฐาน จึงได้มีการทำตามข้อกำหนดซึ่งมีรายละเอียดได้ดังนี้

1. พื้นผิวของแผ่นโลหะด้านในจะต้องมีลักษณะเป็นผิวเรียบ โดยเฉพาะระยะ 100 มิลลิเมตร จากพื้นผิวด้านบน เพื่อไม่ให้เกิดความปั่นป่วนในการไหล และจะต้องติดตั้งในแนวตั้งฉากกับทิศแนวการไหลของน้ำ
2. แผ่นโลหะที่ใช้มักมีความหนาไม่เกิน 5 มม. โดยมีสันด้านบนเรียบทางด้านเหนือน้ำหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร และมีการลบมุม 60° ทางด้านท้ายน้ำ



รูปที่ 3.3 ภาพหน้าตัดของแผ่นฝาย [12]

3. ตัวรองรับที่จะนำมาใช้ในการยึดแผ่นโลหะนั้น ควรทำมาจากเหล็กกล้าคาร์บอนหรือคอนกรีตเพื่อป้องกันการเสียรูปอันเนื่องมาจากแรงดันของน้ำ และต้องมีลักษณะที่ไม่ส่งผลกระทบต่อทางน้ำตกเพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนรูปร่างของน้ำตก

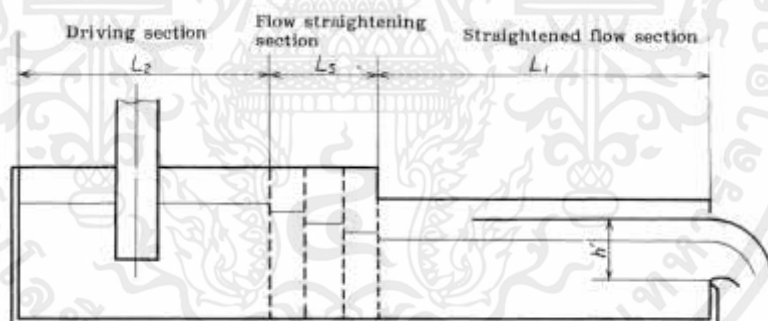
3.1.2.2 ช่องทางน้ำและตะแกรงกันกระเพื่อม

หลังจากที่ทำการสูบน้ำจากบ่อสูบมายังบ่อจ่ายจะทำให้เกิดการกระเพื่อมของน้ำในบ่อจ่ายและช่องทางน้ำ ซึ่งการกระเพื่อมของน้ำนั้นจะส่งผลให้การไหลของน้ำจากฝายกลับไปยังบ่อสูบเกิดความไม่เสถียร และมีการไหลที่ไม่คงตัว อาจส่งผลให้น้ำในบ่อสูบเกิดความปั่นป่วน จึงต้องมีตะแกรงเพื่อลดการกระเพื่อมและลดการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence flow) ที่อาจเกิดขึ้นได้น้ำ

ในการออกแบบตะแกรงกันกระเพื่อมให้เป็นไปตามมาตรฐาน ได้มีการคำนวณระยะในแต่ละส่วนของช่องทางน้ำตามข้อกำหนดตามมาตรฐาน JIS B 8302 1990 ซึ่งในการออกแบบตะแกรงกันกระเพื่อมสำหรับฝายสันคมรูปสามเหลี่ยมนั้น ถูกแบ่งออกเป็น 3 ช่วง โดยมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดขั้นต่ำในการออกแบบช่องทางน้ำ

Part	Requirements	Length (m)
Driving section (L_2)	$> (B + h_{\max})$	> 2.478
Flow straightening section (L_s)	Approx. $(2h_{\max})$	0.957
Straightened flow section (L_1)	$> (B + 2h_{\max})$	> 2.957



รูปที่ 3.4 แผนภาพการกำหนดระยะของช่องทางน้ำ [12]

ในช่วงของ Flow straightening ซึ่งทำหน้าที่ในการปรับกระแสที่ปั่นป่วนจากช่วงแรกให้ดีขึ้น ด้วยการเพิ่มตะแกรงกันกระเพื่อมเข้าไป หากไม่มีส่วนของตะแกรงกันกระเพื่อม บ่อทดสอบจำเป็นจะต้องมีช่วงของ Straightened flow ยาวอย่างน้อย $10B$ (10 เท่าของความกว้างช่องทางน้ำ) ซึ่งจะทำให้บ่อทดสอบมีขนาดใหญ่เกินจำเป็น ดังนั้นช่วงของ Flow straightening จึงมีความสำคัญอย่างมาก

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

3.2.1 ชุดวัดอัตราการไหลของน้ำในระบบท่อปิดและเครื่องบันทึกผลการทดสอบ

เพื่อความแม่นยำในการวัดอัตราการไหลและเป็นไปตามมาตรฐานของเครื่องสูบน้ำ ทางผู้พัฒนาจึงได้เลือกใช้อุปกรณ์วัดอัตราการไหลแบบ Electromagnetic โดยเลือกใช้ของบริษัท Siemens ผลิตในประเทศฝรั่งเศส รุ่น SITRANS F M MAG 5100 W ขนาด DN 200 (8 นิ้ว) ความแม่นยำในการวัด $\pm 0.2\%$



รูปที่ 3.5 Electromagnetic flow meter สำหรับวัดอัตราการไหล [4]

3.2.2 ชุดควบคุมอัตราการไหลของน้ำ

ในการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำนั้น จำเป็นต้องมีการปรับอัตราการไหลที่ละเอียด จึงได้มีการออกแบบให้ชุดทดสอบใช้ Globe valve ซึ่งสามารถใช้เป็นวาล์วเปิดปิดและปรับอัตราการไหลได้ทำให้มีความเหมาะสมในการใช้งาน โดยเลือกใช้ยี่ห้อ ARITA ผลิตในประเทศญี่ปุ่น รุ่น C758 สำหรับท่อขนาด 8 นิ้ว



รูปที่ 3.6 Globe valve สำหรับควบคุมอัตราการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 ชุดวัดความเร็วรอบของเพลาชุดทดสอบ

ในการวัดความเร็วรอบของมอเตอร์เพลาชุดทดสอบ ได้มีการเลือกใช้ Tachometer ยี่ห้อ KIMO ผลิตในประเทศอินเดีย รุ่น CT 110 ใช้โหมด Optic ในการวัดความเร็วรอบของเพลาชุดทดสอบย่าน 60 – 10,000 rpm ความแม่นยำในการวัด $\pm 0.3\%$



รูปที่ 3.7 อุปกรณ์วัดความเร็วรอบ (Tachometer)

3.2.4 อุปกรณ์วัดความดัน

1. Pressure Transmitter

อุปกรณ์สำหรับวัดความดัน โดยทำหน้าที่แปลงสัญญาณจากอุปกรณ์เครื่องมือวัดให้เป็นสัญญาณแบบอนาล็อกมาตรฐาน โดยเลือกใช้ของบริษัท Siemens ผลิตในประเทศสวิตเซอร์แลนด์ รุ่น SITRANS P320 7MF0300 วัดความดันย่าน 0 - 1 บาร์ ความแม่นยำในการวัด $\pm 0.25\%$



รูปที่ 3.8 Pressure Transmitter

3.2.5 ชุดวัดกำลังทางไฟฟ้าของมอเตอร์

อุปกรณ์วัดกำลังทางไฟฟ้าของมอเตอร์นั้นประกอบไปด้วยอินเวอร์เตอร์ เพื่อใช้ในการปรับความเร็วรอบให้ได้ตามที่ออกแบบไว้ ด้วยการปรับความถี่เฮิรตซ์ทางไฟฟ้า



รูปที่ 3.9 อุปกรณ์วัดกำลังทางไฟฟ้าของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.6 ชุดวัดแรงตึงมอเตอร์

อุปกรณ์วัดแรงบิดมอเตอร์ โดยอาศัยการวัดแรงตึงจากมอเตอร์ ทางผู้พัฒนาได้เลือกใช้เป็น Torque sensor จากบริษัท FUTEK ชนิด Non-contact shaft-to-shaft สำหรับวัดแรงอัดและแรงดึง ความแม่นยำในการวัด $\pm 0.2\%$



รูปที่ 3.10 Torque sensor [13]

3.2.7 ชุดต้นกำลังของชุดทดสอบ

อุปกรณ์ต้นกำลังของเครื่องสูบน้ำที่ใช้ในการทดสอบ เลือกใช้เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ โดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กให้เป็นพลังงานกลของยี่ห้อ Hascon รุ่น HC-200L ชนิด Vertical type ขนาด 30 kW ความเร็วรอบ 1500 rpm (4P)



รูปที่ 3.11 DC Motor ชนิด Vertical type [14]

3.3 มาตรฐานการทดสอบสมรรถนะของชุดทดสอบ

ในการทดสอบสมรรถนะของเครื่องสูบน้ำในประเทศไทยนั้น ปัจจุบันยังไม่มีการสร้างข้อกำหนดหรือกำหนดเงื่อนไขสำหรับมาตรฐานการทดสอบ ทางคณะวิจัยจึงศึกษาและเลือกมาตรฐานการทดสอบที่เป็นที่ยอมรับและนิยมนำมาเป็นมาตรฐานการทดสอบในระดับนานาชาติ โดยได้เลือกใช้มาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น (Japan Industrial Standard, JIS) มีพื้นฐานมาจากมาตรฐาน ISO 9906 : 1999 ที่ใช้ในการทดสอบหาประสิทธิภาพของไฮดรอลิกและเครื่องสูบน้ำแบบอาศัยแรงเหวี่ยง ซึ่งมาตรฐานการยอมรับในการทดสอบสมรรถนะของเครื่องสูบน้ำ เหมาะสมกับเครื่องสูบน้ำทุกขนาด และของไหลภายในทุกประเภท โดยไม่คำนึงถึงรายละเอียดโครงสร้างของเครื่องสูบน้ำรวมถึงคุณสมบัติเชิงกล ประกอบไปด้วยมาตรฐาน 2 ระดับ ได้แก่ ระดับ 1 คือการทดสอบที่มีมาตรฐานทั่วไป และมีความแม่นยำสูง เหมาะสำหรับการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำ และ ระดับ 2 ที่มีมาตรฐานการทดสอบที่ต่ำกว่าระดับ 1 แต่ไม่ต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนด

3.3.1 ความผันผวน และความแปรเปลี่ยน

ในขั้นตอนการเก็บผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องสูบน้ำนั้น สามารถตรวจสอบได้จากเครื่องบันทึกผล (Data logger) ซึ่งเมื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์อาจพบว่าข้อมูลอยู่ในรูปแบบจุดที่ต่อเนื่องจนเป็นเส้นกราฟ โดยข้อมูลเหล่านี้ได้มีการนิยามไว้โดยมาตรฐานทั้งรูปแบบ และค่าที่ยอมรับได้จากการวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. ความผันผวน (Fluctuation) : ค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงสั้นๆของการวัด ซึ่งจะมีการขึ้นลงอยู่บริเวณค่ากลาง โดยไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่ากลางในการสังเกตการณ์ครั้งนั้นๆ
2. ความแปรเปลี่ยน (Variation) : การเปลี่ยนแปลงของค่าที่วัดได้ระหว่างการอ่านค่าในแต่ละครั้ง

ในการทดสอบหรือออกแบบเครื่องสูบน้ำ หากแอมพลิจูดความผันผวนสูงเกินไป สามารถลดทอนได้ด้วยการติดตั้งอุปกรณ์หน่วงในเครื่องมือวัดได้ ซึ่งมีส่วนช่วยในการทำให้ค่าที่ได้นั้นอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน

ตารางที่ 3.3 เปอร์เซ็นต์ความผันผวนของข้อมูลกับค่ากลางที่ยอมรับได้

Measured quantity	Permissible amplitude of fluctuation		
	Grade 1 %	Grade 2 %	Grade 3 %
Rate of flow	± 3	± 3	± 6
Differential head	± 3	± 4	± 10
Outlet head	± 2	± 3	± 6
Inlet head	± 2	± 3	± 6
Inlet head for NPSH test	± 3	± 4.5	± 9
Driver power input	± 2	± 3	± 6
Speed of rotation	± 0.5	± 1	± 2
Torque	± 2	± 3	± 6
Temperature	± 0.3 °C	± 0.3 °C	± 0.3 °C

หากเครื่องมือที่ใช้ในการเก็บผลนั้นมีความละเอียดเพียงพอ สามารถอินทิเกรตและมีการชดเชยค่าบวกกลับให้ ผู้ทำการทดสอบไม่จำเป็นต้องอ้างอิงผลกับตารางมาตรฐาน แต่ถ้าหากเครื่องมือที่ใช้นั้นไม่มีความละเอียดเพียงพอ ผู้ทำการทดลองจำเป็นต้องมีการกำหนดช่วงการอินทิเกรตค่าความผันผวนของข้อมูลอย่างเหมาะสม หากค่าเฉลี่ยของปริมาณที่เกี่ยวข้องทั้งหมด (อัตราการไหล เหนือรวม กำลังขับขาเข้า แรงบิด และความเร็วของการหมุน) ไม่เกิดความเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับเวลาแล้ว แสดงว่าการทดสอบนั้นอยู่ในสภาวะคงตัวแล้ว

ถ้าสภาวะคงตัวเกิดขึ้น และค่าความผันผวนน้อยกว่าค่าที่ยอมรับได้ตามที่กำหนดไว้ในตารางที่ 3.4 แล้ว ให้บันทึกค่าที่ได้ ณ จุดทดสอบเพียงหนึ่งคู่มาใช้สำหรับปริมาณแต่ละตัว

3.3.2 เงื่อนไขขั้นตอนการทดสอบ

เพื่อยืนยันจุดรับประกัน Grade 1 และ Grade 2 จะต้องมามีค่าความคลาดเคลื่อนของแต่ละตัวแปรและการวัดค่าต่าง เป็นไปตามข้อกำหนดดังตารางที่ 3.4 โดยบันทึกผลการทดสอบอย่างน้อย 3 จุด สำหรับ Grade 2 และ 5 จุด สำหรับ Grade 1 เพื่อยืนยันจุดหรือช่วงการใช้งานหลักของเครื่องสูบน้ำ

3.3.3 Overall uncertainty

ในการบันทึกผลและการคำนวณนั้น จะต้องมีการกำหนดช่วงของค่าตัวแปรต่าง ๆ ซึ่งช่วงที่กำหนดนั้นคือค่าสูงสุดที่ยอมรับได้ของค่าความไม่แน่นอน โดยแสดงเป็นร้อยละของค่าต่าง ๆ และให้คลาดเคลื่อนได้ไม่เกินค่าที่กำหนดตามมาตรฐาน

ตารางที่ 3.4 ค่าของความไม่แน่นอนโดยรวมที่ยอมรับได้

Quantity	Symbol	Grade 1 %	Grade 2 and 3 %
Rate of flow	e_Q	± 2.0	± 3.5
Speed of rotation	e_n	± 0.5	± 2.0
Torque	e_T	± 1.4	± 3.0
Pump total head	e_H	± 1.5	± 3.5
Driver power input	$e_{p_{gr}}$	± 1.5	± 3.5
Pump power input (computed from torque and speed of rotation)	e_p	± 1.5	± 3.5
Pump power input (computed from driver power and motor efficiency)	e_p	± 2.0	± 4.0

ตารางที่ 3.5 ค่าความไม่แน่นอนโดยรวมของประสิทธิภาพ

Quantity	Symbol	Grade 1 %	Grade 2 and 3 %
Overall efficiency (computed from Q, H and P_{gr})	e_{gr}	± 2.9	± 6.1
Pump efficiency (computed from Q, H, T and n)	e_{η}	± 2.9	± 6.1
Pump efficiency (computed from Q, H, P_{gr} and η_{mot})	e_{η}	± 3.2	± 6.4

3.4 ขั้นตอนการทดสอบเครื่องสูบน้ำ

1. ตรวจสอบความเรียบร้อยของอุปกรณ์และชุดทดสอบ
2. ตั้งค่า Load ให้เป็น 0 N-m จากนั้นเดินเครื่องชุดทดสอบแบบไม่มีน้ำในถังทดสอบ ที่ความเร็วรอบที่ออกแบบไว้ (1450 rpm) แล้วทำการวัดความเร็วรอบ และ torque ได้เป็นค่า torque no load ให้ทำการปิดเครื่องรอให้บูชเย็นโดยหล่อเย็นด้วยน้ำ เปิดใหม่แล้วทำการวัดซ้ำเพื่อหาค่าเฉลี่ยและค่าความคลาดเคลื่อนอีก 2 ครั้ง โดยการวัดแต่ละครั้งต้องรอให้ค่านิ่งอย่างน้อย 10 วินาที
3. ทำการเติมน้ำเข้าสู่ระดับทดสอบ เดินเครื่องที่อัตราการไหลสูงสุดแล้วทำการหยุดเครื่องเพื่อให้น้ำไหลออกจากถังทดสอบด้านบนจนถึงจุดต่ำสุดของ weir ทำการตั้งที่วัดระดับน้ำให้อยู่ที่ขีด 0 ของไม้บรรทัด จากนั้นเดินเครื่องอีกครั้งที่อัตราการไหลสูงสุด เมื่อน้ำในบ่อสูบลดลงให้เติมน้ำเพื่อให้กลับเข้าสู่ระดับทดสอบ
4. เริ่มการทดสอบแรกที่ตำแหน่งวาล์วเปิดสุด จากนั้นรอให้การทำงานของเครื่องสูบน้ำอยู่ในสภาวะคงที่ (ดูได้จากมาตรฐานการกำหนดสภาวะคงที่จาก JIS B 8301) ซึ่งสังเกตได้จากอัตราการไหลเฉลี่ยจากเครื่องวัดอัตราการไหลในคาบเวลาที่กำหนดหรือจนกว่าค่าความผันผวนจะลดลง โดยต้องไม่เกิน 0.6% สำหรับ grade 1 ในช่วงเวลา 10 วินาทีเป็นอย่างน้อย และใช้หลักการเดียวกันสำหรับ torque ที่วัดได้จาก torque sensor และความเร็วรอบ จากนั้นทำการบันทึกผลการทดลองที่ได้
5. ทำการบันทึกผลการทดสอบได้แก่ ค่าอัตราการไหล จากทั้ง electromagnetic flow meter และ อัตราการไหลจากการวัดความสูง head weir ค่าแรงบิด ความดัน รอบการหมุน และ กำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ และคำนวณค่า overall uncertainties ของการทดสอบในแต่ละครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เมื่อทำการบันทึกผลแล้ว ให้ค่อยๆปรับลดอัตราการไหลลงด้วย Globe valve เพื่อหาจุดทำงานและพล็อตกราฟหาช่วง BEP โดยในขณะที่ทำการปรับลดอัตราการไหลลง ให้ทำการพร่องน้ำออกจากบ่อสูบให้กลับเข้าสู่ระดับอ้างอิง

7. ดำเนินการตามขั้นตอนที่ 3 ถึง 5 โดยทำการทดสอบอย่างน้อย 5 อัตราการไหลตามที่ได้กำหนดในมาตรฐาน JIS B 8301 ได้แก่ $\pm 4\%$, $\pm 8\%$ BEP และ จุดที่เกิดเฮดสูงสุด



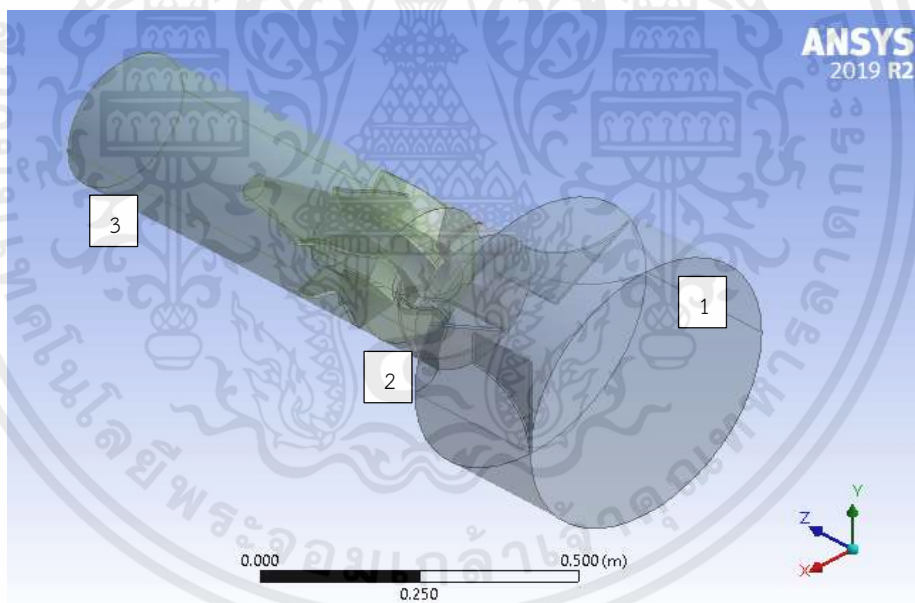
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

แนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพ ของเครื่องสูบน้ำแบบไหลตามแนวแกน

4.1 การสร้างแบบจำลอง CFD

การปรับปรุงประสิทธิภาพโดยใช้การสร้างแบบจำลองการไหลด้วยกระบวนการ CFD โดยใช้โปรแกรม Ansys CFX จะต้องทำการสร้าง CAD ของส่วนประกอบต่างๆของเครื่องสูบน้ำขึ้นมาก่อน ซึ่งได้แก่ ครีบจัดเรียงกระแสที่ทางเข้า (Guide cone) ใบพัด (Impeller) และครีบเรียงกระแสน้ำ (Guide vane) จากนั้นนำส่วนต่างๆมาประกอบกัน และทำการแบ่งพื้นที่ของไหล (Fluid domain) ออกเป็น 3 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ลักษณะการแบ่งพื้นที่ของไหล (Fluid domain) 3 ส่วน

- (1) บริเวณทางเข้า (Guide cone)
- (2) บริเวณใบพัด (Impeller)
- (3) บริเวณครีบเรียงกระแสน้ำ (Guide vane)

จากนั้นนำไฟล์เข้าสู่โปรแกรม Ansys CFX ทำการแบ่งพื้นที่ของไหลให้เป็นปริมาตรควบคุมขนาดเล็กทั้งหมด 5,100,000 ปริมาตรควบคุมหรือเรียกว่าการสร้างเมช (Mesh generation) และทำ Pre-processing ซึ่งประกอบด้วยการระบุคุณสมบัติของของไหล ระบุเงื่อนไขขอบเขตที่ทางเข้าและทางออก และระบุบริเวณที่มีการหมุนในช่วงของใบพัด (Moving reference frame) และเงื่อนไขการลู่เข้าหาคำตอบ (Convergence criteria) ซึ่งแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.1 จากนั้นจึงเริ่มการคำนวณแบบทำซ้ำด้วย CFX solver โดยการซ้ำจะดำเนินไปจนกว่าค่าส่วนเหลือโดยรวมมีค่าน้อยกว่า 0.0001 จึงจะถือว่าค่าที่ได้เป็นคำตอบ และแสดงผลจากการคำนวณใน Post Processing

ตารางที่ 4.1 การกำหนด Boundary Condition เพื่อทำการวิเคราะห์เครื่องสูบน้ำ

Boundary Condition	
Analysis type	Steady state
Mesh	5,100,000
Turbulence model	SST
Fluid domain	Water
Moving Reference Frame	1,450 rpm
Inlet	Total Pressure = 1 atm
Outlet	Mass Flow rate = 190 kg/s
Convergence residual	0.0001

เงื่อนไขที่ขอบ (Boundary Condition) จากการกำหนดดังตารางที่ 4.1 การทำแบบจำลองนี้เลือกใช้แบบจำลองปั่นป่วนชนิด Standard $k - \omega$ SST (SST, Shear Stress Transport Turbulence Model) ซึ่งสมการการเคลื่อนที่ของการไหลแบบปั่นป่วนประกอบด้วยสมการความต่อเนื่องและสมการโมเมนตัม

สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation)

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0$$

สมการโมเมนตัม (Momentum equation)

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่	u_i, u_j	คือ ความเร็วของของไหล
	P	คือ ความดัน
	ρ	คือ ความหนาแน่น
	μ	คือ สัมประสิทธิ์ของความหนืด

4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับปรุง

การปรับปรุงประสิทธิภาพโดยการปรับปรุงลักษณะครีบริยงกระแสน้ำ ได้ใช้โปรแกรม Bladegen ในการเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อให้รูปทรงครีบริยงกระแสน้ำเป็นไปตามที่ต้องการ ดังนั้นจึงต้องรู้การกำหนดพารามิเตอร์ของโปรแกรม ซึ่งได้ใช้พารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

4.2.1 มุมองศาที่ทางเข้าและทางออกของใบพัดหรือครีบริยงกระแส

มุมองศาที่ทางเข้า (Leading edge : LE) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการช่วยจัดเรียงกระแสน้ำ เนื่องจากหากมุมองศาที่ทางเข้าของใบพัดหรือครีบริยงกระแส มุมองศาไม่รับกับกระแสที่วิ่งเข้ามาจะทำให้ของไหลเกิดการแยกตัวได้ แสดงตำแหน่ง LE ดังรูปที่ 4.2

มุมองศาที่ทางออก (Tailing edge : TE) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการช่วยจัดเรียงกระแสที่ทางออกของใบให้มีการไหลเชิงมุมลดลง โดยมุมองศาควรมีค่ามากกว่า 90 องศา เพื่อลดการสิ้นเปลืองของกระแสที่ทางออก แสดงตำแหน่ง TE ดังรูปที่ 4.2

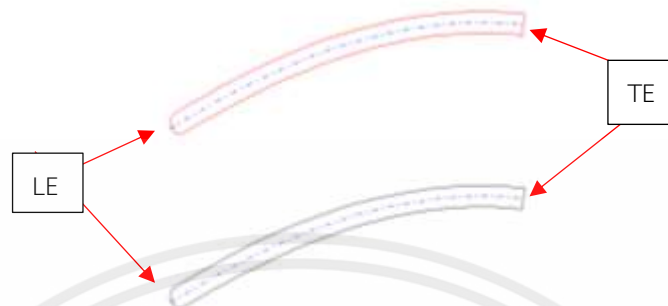
4.2.2 ระยะจากโคนใบถึงปลายใบ

ระยะจากโคนใบถึงปลายใบ (span) เป็นการบอกตำแหน่งเพื่อใช้ในการบอกตำแหน่งที่จะกำหนดมุมองศาที่แต่ละระยะ ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 0.0 - 1.0 เนื่องจากที่ระยะต่างๆ มีกระแสที่ไหลเข้าและออกที่ใบพัดหรือครีบริยงใบในมุมองศาที่ต่างกัน โดยสามารถกำหนดจำนวน span ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งมีการกำหนดให้มี 5 span คือ span 0.0, span 0.25, span 0.50, span 0.75, span 1.0

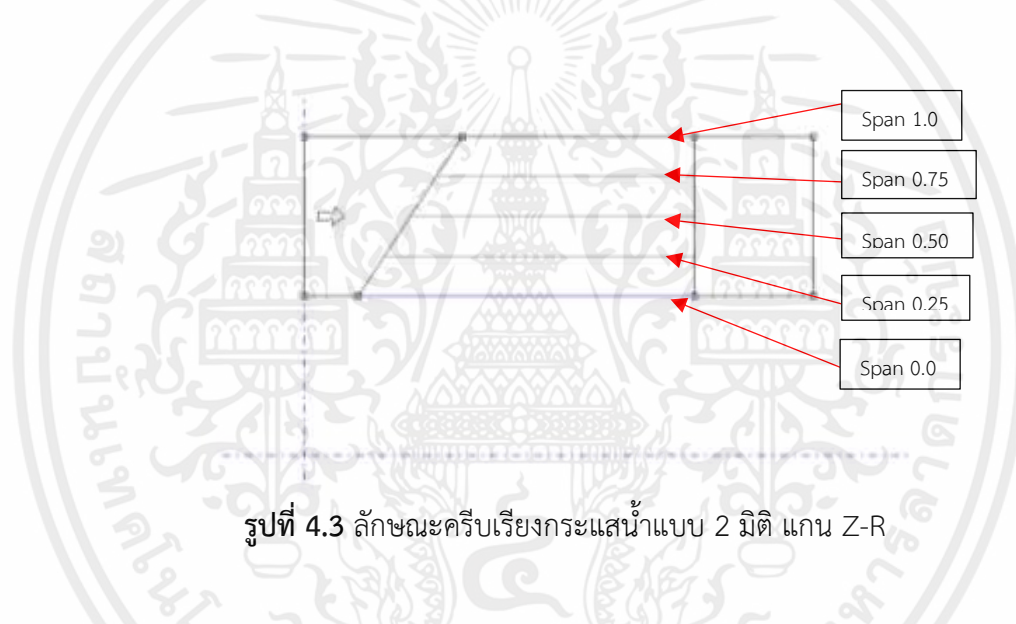
4.3 แนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพ

เนื่องจากทีมนักวิจัยต้องการพัฒนาเครื่องสูบน้ำแบบไหลตามแนวแกนในประเทศไทยให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น จึงได้มีการนำเครื่องสูบน้ำตัวต้นแบบมาปรับปรุงในรูปแบบต่างๆ เพื่อหาแนวทางในการปรับปรุงให้เครื่องสูบน้ำมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ซึ่งทางเราได้มุ่งเน้นไปที่การปรับปรุงตัวครีบริยงกระแสน้ำเป็นหลัก โดยใช้การทำแบบจำลอง CFD ในโปรแกรม Ansys CFX เพื่อปรับปรุง

รูปทรงของครีบริยงกระแส และคำนวณหาประสิทธิภาพเพื่อนำมาเปรียบเทียบกันว่าการปรับเปลี่ยนลักษณะไหนมีแนวโน้มที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำ

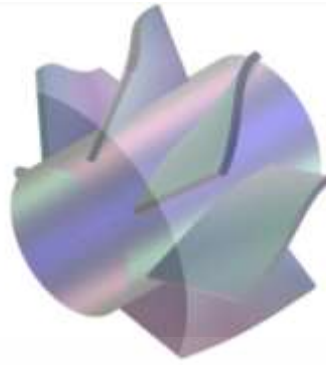


รูปที่ 4.2 ลักษณะครีบริยงกระแสน้ำตัวต้นแบบที่ span 0

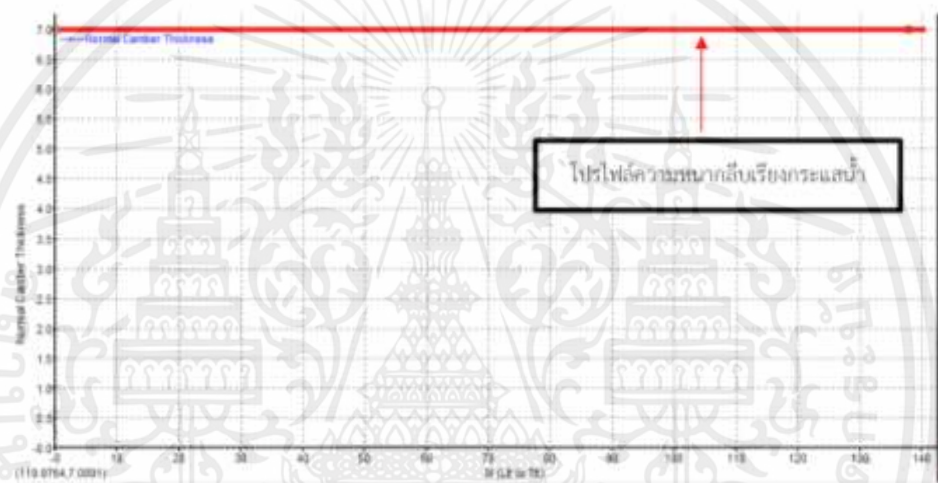


รูปที่ 4.3 ลักษณะครีบริยงกระแสน้ำแบบ 2 มิติ แกน Z-R

โดยครีบริยงกระแสน้ำตัวต้นแบบมีลักษณะเป็นครีบริยงที่มีความหนาเท่ากันตลอด แต่จะมีมุมของการไหลที่แตกต่างกัน โดยมีลักษณะมารับช่วงต่อการไหลของดุมใบพัดได้พอดี มีครีบริยงทั้งหมด 7 ครีบริยง โดยครีบริยงมีความหนาอยู่ที่ 7 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4.2 - 4.5 ได้นำมาพัฒนาโดยการปรับปรุงลักษณะของครีบริยงกระแสน้ำหลัก (Main vane) และต่อมาได้มีการติดตั้งครีบริยงกระแสน้ำร่อง (Splitter vane) โดยเราได้ทำแบบจำลองที่จุด Best Efficiency Point (BEP) ตามตารางที่ 4.1 ดังนี้



รูปที่ 4.4 ลักษณะครีบเรียงกระแสน้ำของตัวต้นแบบ แบบ 3 มิติ



รูปที่ 4.5 โปรไฟล์ความหนาของครีบเรียงกระแสน้ำหลักตัวต้นแบบ

4.3.1 การเปลี่ยนแปลงลักษณะของครีบเรียงกระแสน้ำหลัก

การเปลี่ยนแปลงลักษณะของครีบเรียงกระแสน้ำมีหลักการมาจากแรงฉุด (Drag force) ซึ่งหมายถึงแรงที่เกิดจากของไหลกระทำต่อวัตถุที่จมอยู่ในของไหล โดยเป็นแรงที่จะต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุผ่านของไหลนั้นๆ หรือในทางกลับกันก็เป็นแรงที่วัตถุต้านการเคลื่อนที่ของของไหลเช่นกัน แรงฉุดที่เกิดขึ้นบนวัตถุที่จมอยู่ในของไหลสามารถ แบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ แรงฉุดที่เกิดจากแรงเหนือน้ำซึ่งเรียกว่า แรงฉุดจากความเสียดทานที่พื้นผิว (Friction drag หรือ Surface drag) ซึ่งจะมีความสำคัญต่อแรงฉุดที่เกิดขึ้นกับวัตถุที่มีรูปทรงลู่ตามทิศทางการไหล (Streamlined body) และแรงฉุดที่เกิดจากความดันรอบพื้นผิววัตถุมีชื่อเรียกว่า แรงฉุดจากความดัน (Pressure drag) ซึ่งจะมีความสำคัญต่อแรงฉุดที่เกิดขึ้นกับวัตถุที่มีรูปทรงไม่ลู่ตามทิศทางการไหล (Blunt body)

แรงฉุด (Drag Force)

$$F_D = \frac{\rho A v^2}{2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์แรงฉุด (Drag coefficient)

$$C_D = \frac{F}{F_D}$$

โดยที่ F คือ แรงฉุดที่เพิ่มขึ้นจริงกับวัตถุ

v คือ ความเร็วเฉลี่ยในการไหลของของไหล (m/s)

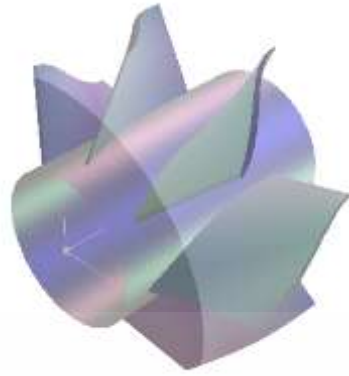
A คือ พื้นที่หน้าตัดของวัตถุที่จมอยู่ในของไหลและตั้งฉากกับทิศทางการไหล (m^2)

ดังนั้นเราจึงได้เปลี่ยนรูปทรงของครีบริยงกระแสน้ำให้เป็นรูปทรงที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงฉุดน้อยๆ เพื่อให้ครีบริยงกระแสน้ำไม่ต้านการไหลของของไหล ดังรูปที่ 4.6 จะทำให้เห็นว่ารูปทรงแบบไหนมีค่าสัมประสิทธิ์แรงฉุดเท่าไร

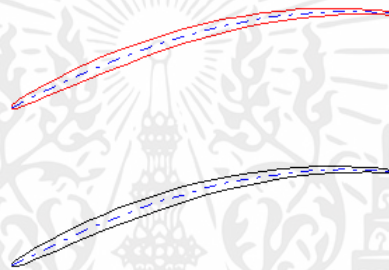


รูปที่ 4.6 ลักษณะรูปทรงที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงฉุด

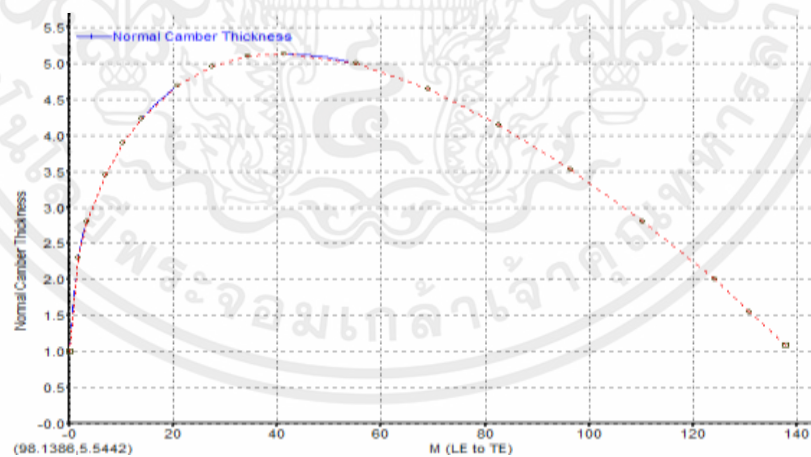
จากการศึกษาจากการทำแบบจำลอง โดยการเปลี่ยนรูปทรงของครีบริยงกระแสน้ำหลักจากความหนาคงที่ (Uniform thickness-shape) เป็นรูปทรงไฮโดรฟอยล์ (Hydrofoil shape) ซึ่งอ้างอิงรูปทรงมาจาก NACA0006 [ภาคผนวก ก] ซึ่งเมื่อนำมาปรับขนาดโดยเอาระยะกับความหนาทำอัตราส่วนกับความยาวของตัวใบครีบริยงกระแสน้ำหลักจะได้ ดังรูปที่ 4.7 - 4.9



รูปที่ 4.7 ลักษณะครีบริยงกระแสน้ำทรงไฮโดรฟอยล์ แบบ 3 มิติ



รูปที่ 4.8 ลักษณะครีบริยงของครีบริยงกระแสน้ำทรงไฮโดรฟอยล์ที่ span 0

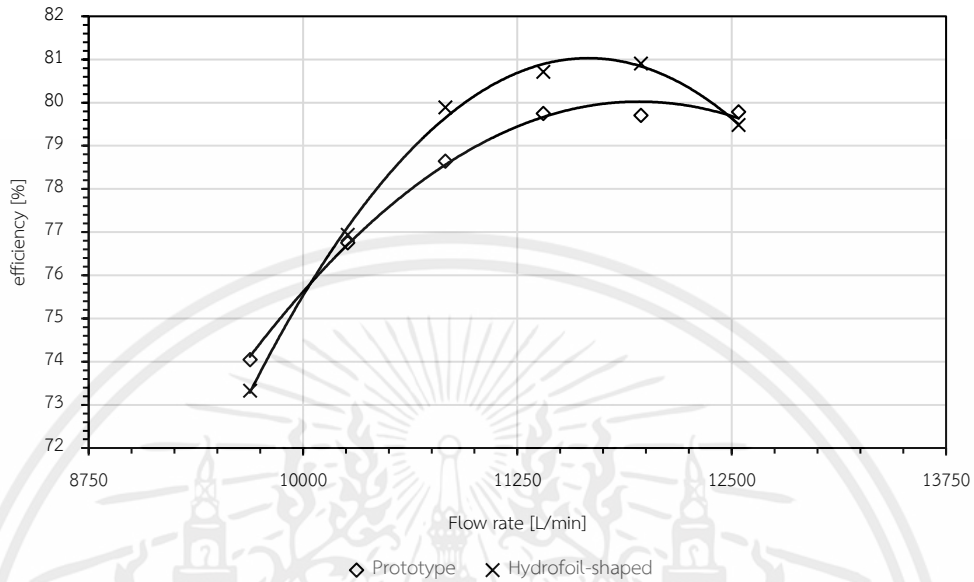


รูปที่ 4.9 โปรไฟล์ความหนาของครีบริยงกระแสน้ำหลักทรงไฮโดรฟอยล์

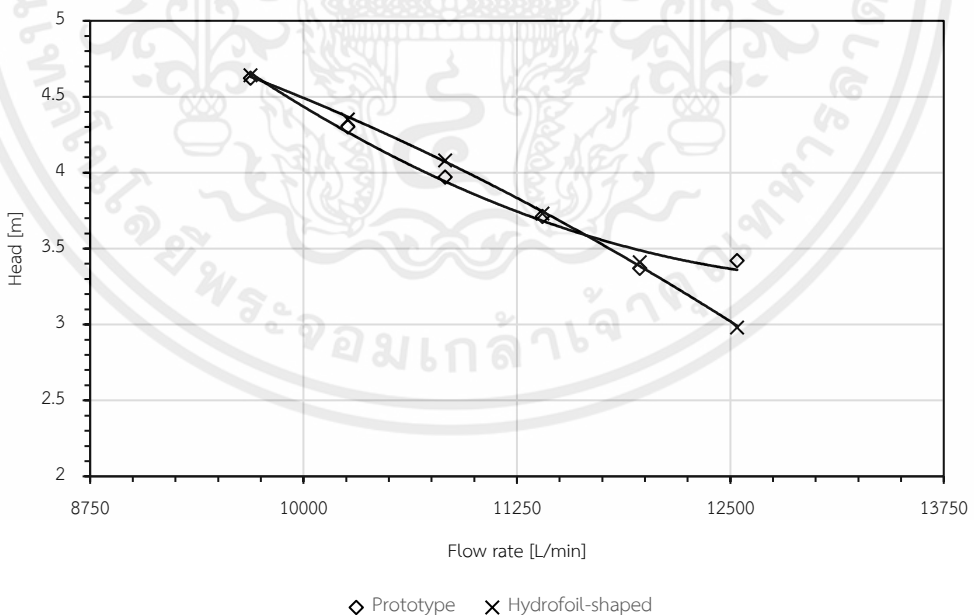
เมื่อนำครีบริยงกระแสน้ำที่ปรับปรุงรูปทรงแล้วมาทำแบบจำลอง เพื่อหาค่าประสิทธิภาพ และเสตของเครื่องสูบ จะเห็นว่าการเปลี่ยนรูปทรงทำให้ค่าประสิทธิภาพมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงใกล้ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับอัตราการไหลที่จุด BEP เดิมดังแสดงในรูปที่ 4.10 และแนวโน้มของเฮดมีค่าที่ลดลงเร็วกว่าตัวต้นแบบดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.10 กราฟเปรียบเทียบอัตราการไหลกับประสิทธิภาพของครีบริยงกระแสน้ำตัวต้นแบบกับครีบริยงกระแสน้ำทรงไฮโดรฟอยล์

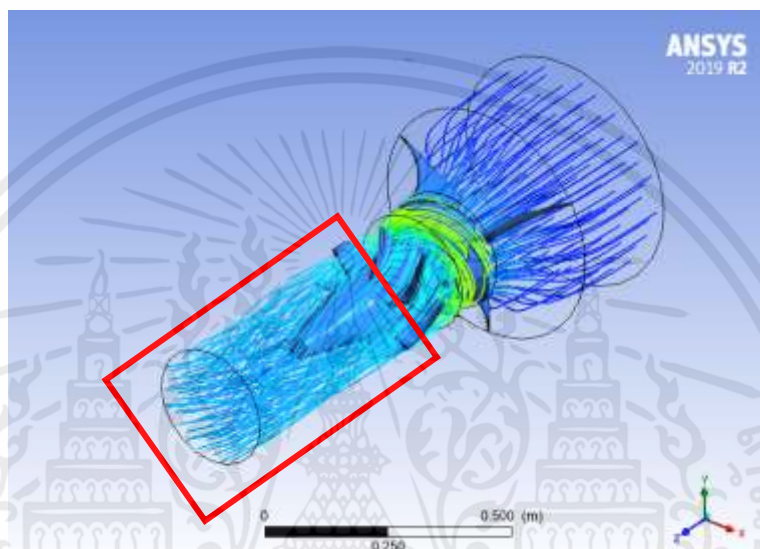


รูปที่ 4.11 กราฟเปรียบเทียบอัตราการไหลกับเฮดของครีบริยงกระแสน้ำตัวต้นแบบกับครีบริยงกระแสน้ำทรงไฮโดรฟอยล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

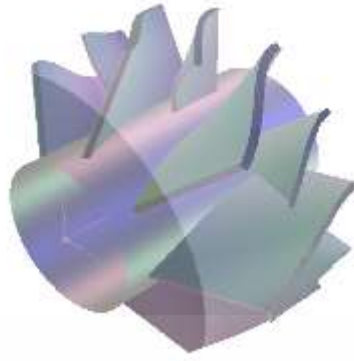
4.3.2 การติดตั้งครีบริยงกระแสน้ำารองหรือสปลิตเตอร์เวน

เนื่องจากโครงการทดสอบเครื่องสูบน้ำตัวต้นแบบนั้น จะนำตัวต้นแบบใบพัดและครีบริยงกระแสน้ำไปใช้งานแบบ 2 ชุดต่ออนุกรมกัน ทำให้ต้องมาพิจารณาการไหลที่ทางออกของตัวครีบริยงกระแสน้ำแรกว่ากระแสน้ำมีการไหลแบบใด

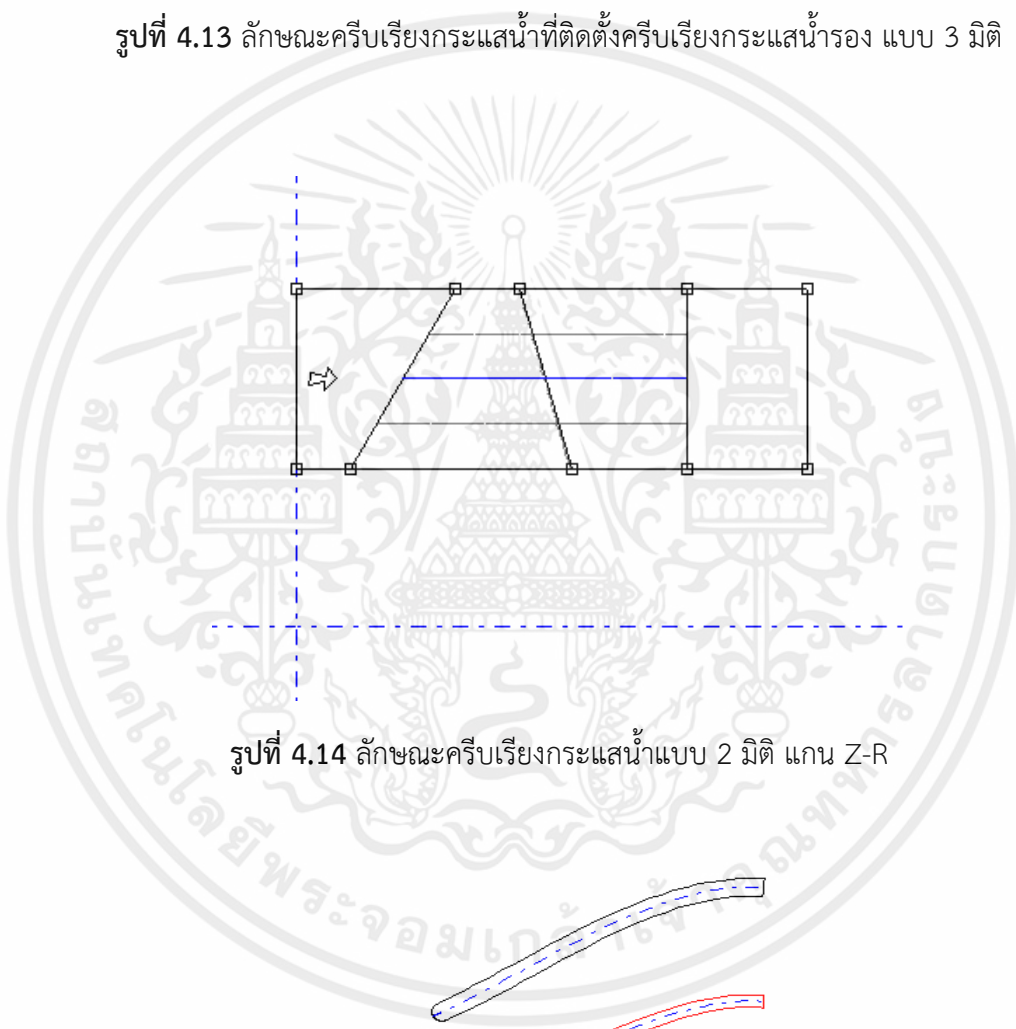


รูปที่ 4.12 การไหลแบบหมุนควงบริเวณหลังครีบริยงกระแสน้ำ

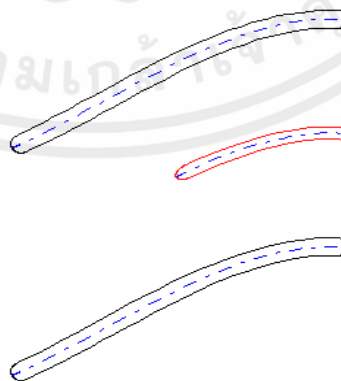
ซึ่งพบว่าการไหลแบบหมุนควง (swirl flow) ที่ทางออกของครีบริยงกระแสน้ำแรกก่อนเข้าสู่ใบพัดชุดที่ 2 ดังรูปที่ 4.12 จึงได้หาวิธีในการลดการหมุนควงให้น้อยลง เพื่อให้ใบพัดชุดที่ 2 ได้ทำงานที่สภาวะใกล้เคียงกับที่ออกแบบมากที่สุด จึงได้มีการติดตั้งครีบริยงกระแสน้ำรองเข้าไป ซึ่งมีการกำหนดขนาดและลักษณะดังรูปที่ 4.13 - 4.15 เพื่อช่วยจัดเรียงกระแสที่ออกจากครีบริยงกระแสน้ำแรกให้มีความเร็วเชิงมุม (Angular velocity) ลดลง



รูปที่ 4.13 ลักษณะครีบริยงกระแสน้ำที่ติดตั้งครีบริยงกระแสน้ำร่อง แบบ 3 มิติ



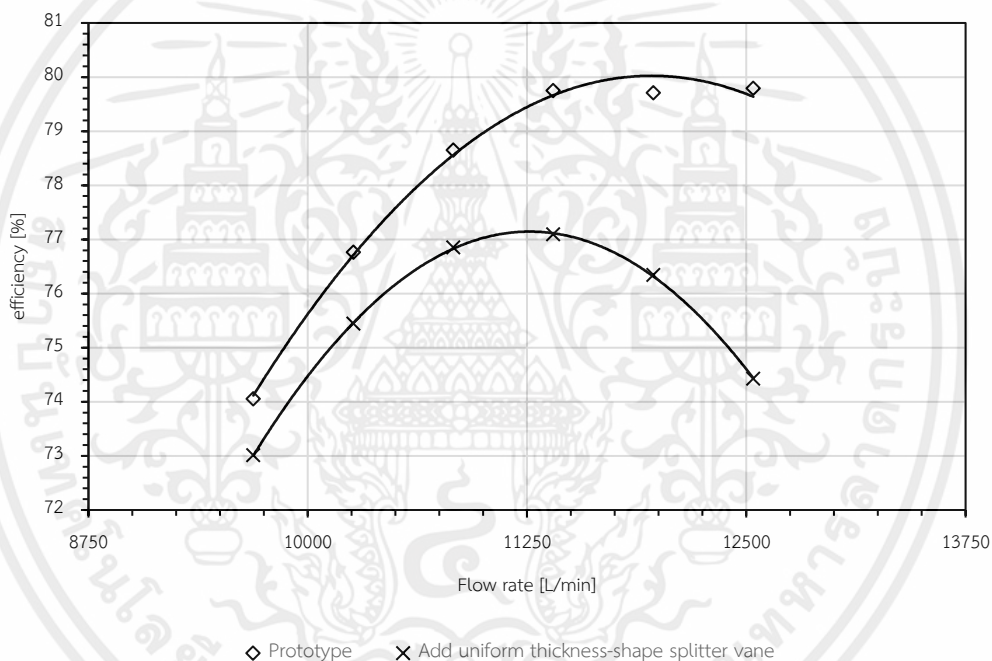
รูปที่ 4.14 ลักษณะครีบริยงกระแสน้ำแบบ 2 มิติ แกน Z-R



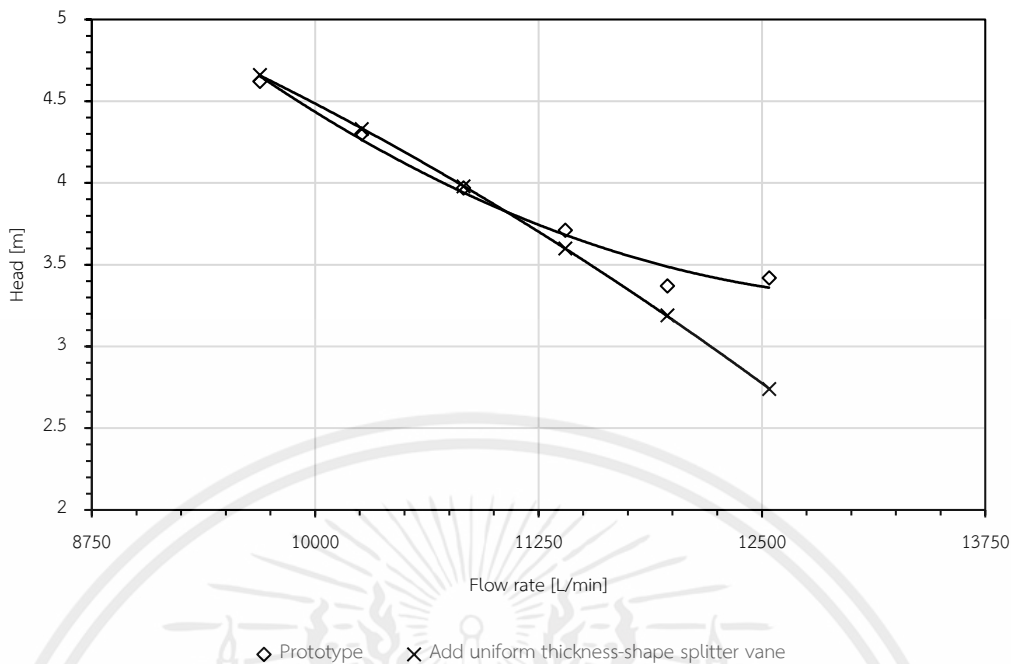
รูปที่ 4.15 ลักษณะครีบริยงของครีบริยงกระแสน้ำที่ติดตั้งครีบริยงกระแสน้ำร่องที่ span 0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่า การเพิ่มครีบริยงกระแสน้ำรองเข้าไปจะช่วยปรับเปลี่ยนการไหลของกระแสน้ำไหลเข้ามาปะทะกับตัวครีบริยงกระแสน้ำรองทำให้ช่วยลดการไหลแบบหมุนควงได้บางส่วน แต่บริเวณช่องว่างที่กระแสน้ำไม่โดนครีบริยงกระแสน้ำรองยังคงมีการไหลแบบหมุนควงเกิดขึ้นอยู่ ทำให้กระแสน้ำไหลออกยังคงมีความเร็วเชิงมุมหลงเหลืออยู่ ซึ่งทั้งนี้การติดครีบริยงกระแสน้ำรองเพิ่มยังทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานเนื่องจากเพิ่มพื้นที่ผิวที่ทำให้เกิดการเสียดทานกับของไหล ทำให้ประสิทธิภาพและเสถียรของเครื่องสูบน้ำลดลงดังแสดงในรูปที่ 4.16 - 4.17 และหากเพิ่มที่ความหนาของครีบริยงมากไปจะทำให้ของไหลเกิดการแยกตัวเกิดเป็นการไหลแบบหมุนวงได้ แต่ในขณะเดียวกันก็ไม่ควรใส่ที่ความหนาน้อยเกินไปเพราะจะมีผลอันเนื่องมาจากความแข็งแรงด้วย



รูปที่ 4.16 กราฟเปรียบเทียบอัตราการไหลกับประสิทธิภาพของครีบริยงกระแสน้ำตัวต้นแบบกับครีบริยงกระแสน้ำที่มีครีบริยงกระแสน้ำรอง

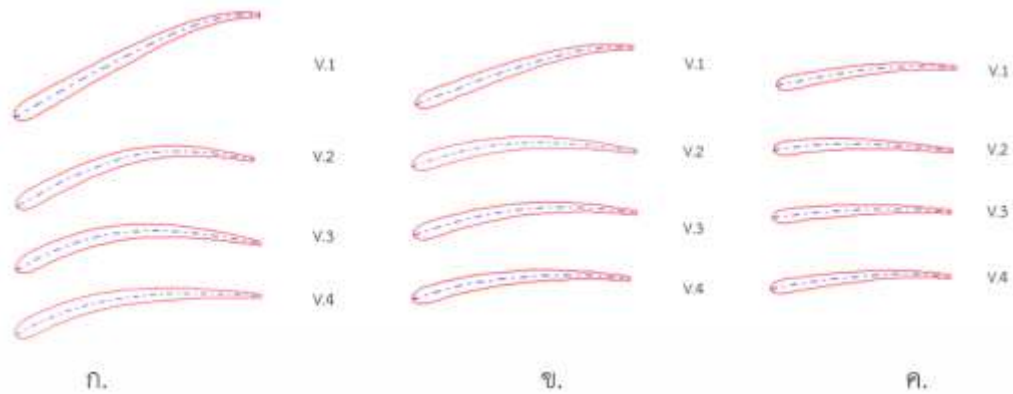


รูปที่ 4.17 กราฟเปรียบเทียบอัตราการไหลกับเฮดของครีบริยงกระแสน้ำตัวต้นแบบกับครีบริยงกระแสน้ำที่มีครีบริยงกระแสน้ำรอง

4.3.3 การศึกษาตำแหน่งในการติดตั้งครีบริยงกระแสน้ำรอง

จากการติดตั้งครีบริยงกระแสน้ำรองระหว่างครีบริยงกระแสน้ำหลักผู้พัฒนาได้พิจารณาว่าการติดตั้งที่บริเวณในหัวข้อที่ 4.3.2 ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานอันเนื่องมาจากพื้นที่หน้าตัดในการไหลของของไหลลดลง จึงได้มีการเปลี่ยนตำแหน่งในการติดตั้งโดยผู้พัฒนามีแนวคิดให้ติดตั้งบริเวณหลังครีบริยงกระแสน้ำหลัก ซึ่งสามารถพิจารณาการติดตั้งได้ 2 แบบ คือ การติดตั้งในแนวรัศมี และการติดตั้งในแนวแกน และจากการเปลี่ยนรูปทรงในหัวข้อที่ 4.3.1 จึงปรับรูปทรงครีบริยงกระแสน้ำรองให้เป็นทรงไฮโดรฟอยล์ตามครีบริยงกระแสน้ำหลักด้วย

ผู้พัฒนาทำการศึกษาจากการติดตั้งครีบริยงกระแสน้ำรองบริเวณหลังใบครีบริยงกระแสน้ำและอยู่กึ่งกลางระหว่างครีบริยงกระแสน้ำหลักทั้ง 2 ใบ โดยหามุมองศา LE ที่เหมาะสมเพื่อไม่ให้เกิดการแยกตัวของของไหลตามภาคผนวก ก ทั้งหมด 5 span แต่เนื่องจากครีบริยงกระแสน้ำรองใช้ความสูงในแนวรัศมีเพียงครึ่งหนึ่งของครีบริยงกระแสน้ำหลักจึงแสดงลักษณะเพียงแค่ 3 span คือ span 1.0 ดังรูปที่ 4.18 (ก), span 0.75 ดังรูปที่ 4.18 (ข) และ span 0.5 ดังรูปที่ 4.18 (ค)



รูปที่ 4.18 ลักษณะของกิลิปเรียงกระแสน้ำรองทั้ง 4 แบบที่

ก. Span 1.0 ข. Span 0.75 ค. Span 0.5

จากการทำแบบจำลองผู้พัฒนาได้สร้างครีบริเรียงกระแสน้ำรองขึ้นมา 4 แบบ และหาค่าประสิทธิภาพ ค่าเฮด และค่าแรงบิดของครีบริเรียงกระแสน้ำรองทั้ง 4 แบบมาเปรียบเทียบกัน โดยนำมาติดตั้งบริเวณหลังครีบริเรียงกระแสน้ำหลักทรงไฮโดรพอยล์ ซึ่งกำหนดอัตราการไหลเดียวกันที่จุด BEP และติดตั้งที่ระยะห่างจากทางเข้า 0.65 m

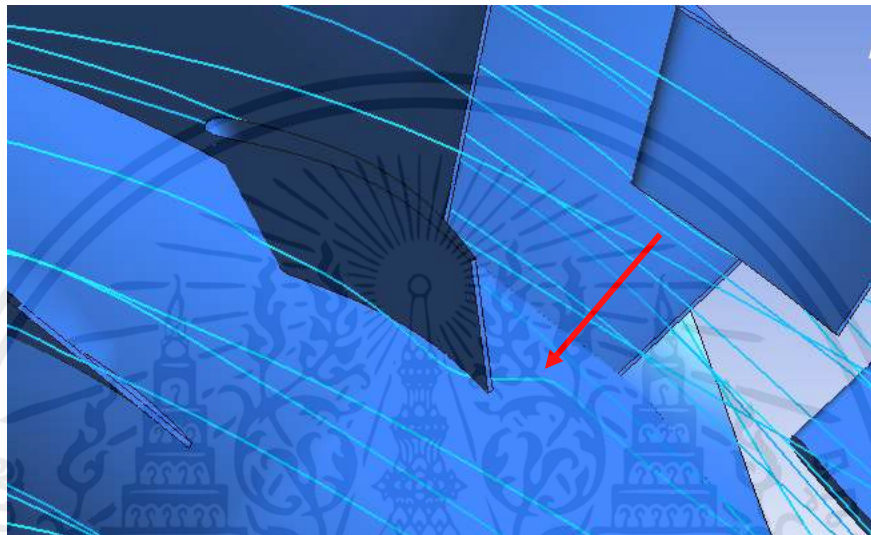
ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพ เฮดและแรงบิดของครีบริเรียงกระแสน้ำรองทั้ง 4 แบบ

	ระยะห่างจากทางเข้า 0.65 [m]			
	splitter v.1	splitter v.2	splitter v.3	splitter v.4
ประสิทธิภาพ [%]	80.596	79.992	80.183	80.264
เฮด [m]	3.751	3.724	3.732	3.736
แรงบิด [N-m]	57.115	57.126	57.111	57.114

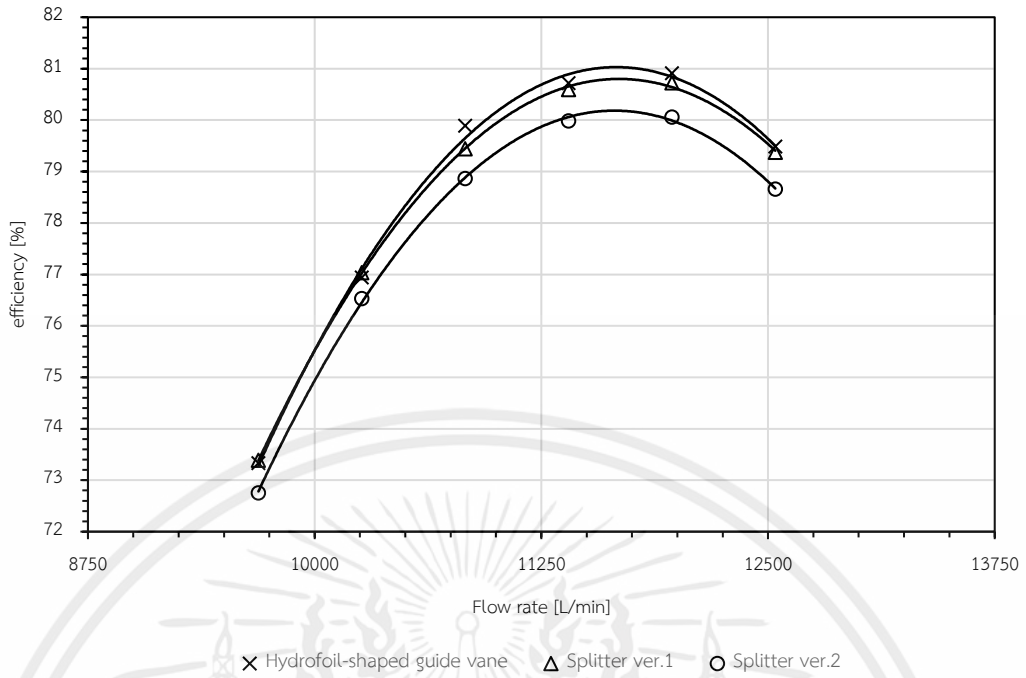
จากตารางข้างต้นทำให้ผู้พัฒนาเห็นถึงผลกระทบในการเปลี่ยนมุมมองของครีบริเรียงกระแสน้ำรอง ซึ่งในเวอร์ชัน 1 จะเห็นได้ว่ารูปทรงของครีบริเรียงมีการตัดเพียงเล็กน้อยที่ปลายใบและไม่ได้ชดเชยมุม TE ของครีบริ จึงไม่ค่อยช่วยลดการไหลแบบหมุนควงที่ทางออกก่อนเข้าใบพัดชุดที่ 2 จึงทำครีบริเรียงกระแสน้ำรองเวอร์ชัน 2 ที่เริ่มตัดครีบริที่กลางใบและมีการชดเชยมุม TE แต่การชดเชยมุม TE มากเกินไปทำให้ค่าประสิทธิภาพมีค่าลดลง จึงได้ปรับมุมมองและการตัดใบ เวอร์ชัน 3 ให้อยู่ในระหว่างเวอร์ชัน 1 และเวอร์ชัน 2 ทำให้ค่าประสิทธิภาพสูงขึ้นเล็กน้อย แต่เกิดกระแสไหลวนที่ปลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

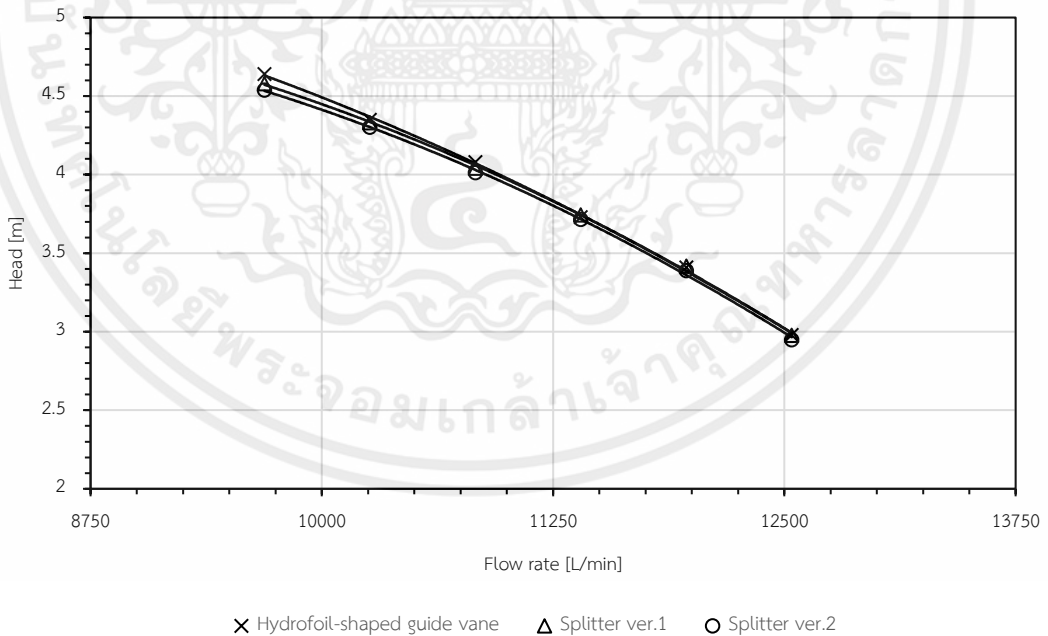
ใบ (Tip Vortex) ที่บริเวณปลายใบดังรูปที่ 4.19 ทำให้ปรับครีบริยงกระแสน้ำเวอร์ชั้น 4 ให้เอียงจากระนาบตั้งฉากจากผิวท่อ เพื่อให้กระแสไหลจากบริเวณกลางท่อไปที่ผิวท่อจะได้ลดการเกิดกระแสไหลวนที่ปลายใบ และทำให้ค่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น โดยดูมุมมองศาทที่ทางออกก่อนเข้าใบพัดชุดที่ 2 ได้จากภาคผนวก ก จะแสดงให้เห็นว่าครีบริยงกระแสน้ำร่องเวอร์ชั้น 2 ช่วยให้กระแสที่ทางออกเกือบจะตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดท่อ ซึ่งเป็นเงื่อนไขในการออกแบบใบพัด



รูปที่ 4.19 การเกิดกระแสไหลวนที่ปลายใบของครีบริยงกระแสน้ำร่องเวอร์ชั้น 3



รูปที่ 4.20 กราฟเปรียบเทียบอัตราการไหลกับประสิทธิภาพของครีบเรียงกระแสน้ำทรงไฮโดรฟอยล์กับครีบเรียงกระแสน้ำที่มีครีบเรียงกระแสน้ำรองเวอร์ชัน 1 และ 2

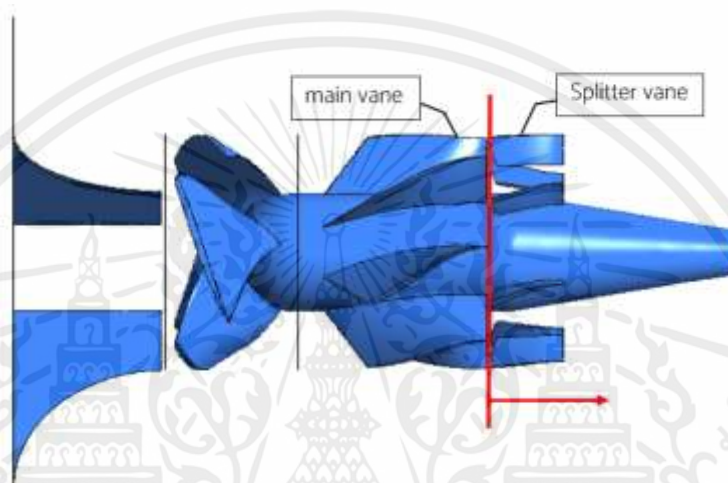


รูปที่ 4.21 กราฟเปรียบเทียบอัตราการไหลกับเฮดของครีบเรียงกระแสน้ำทรงไฮโดรฟอยล์กับครีบเรียงกระแสน้ำที่มีครีบเรียงกระแสน้ำรองเวอร์ชัน 1 และ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3.1 การเปลี่ยนตำแหน่งตามแนวแกน

จากการทำแบบจำลองผู้พัฒนาได้ทำแบบจำลองโดยเลื่อนระยะที่ติดตั้งใบครีบริยง กระแสรองให้อยู่ห่างจากครีบริยงกระแสหลักมากขึ้นโดยจากเดิมศึกษาที่ระยะ 0.65 m เปลี่ยนเป็นที่ระยะ 0.70 m ซึ่งมีทิศทางดังแสดงในรูปที่ 4.22 โดยทำการเปลี่ยนมุม LE ให้เหมาะสมกับระยะที่ติดตั้งด้วย พบว่าการเปลี่ยนตำแหน่งตามแนวแกน ไม่ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพสูงขึ้นหรือลดลง แต่มีผลต่อค่าแรงบิดและค่าเฮดเพียงเล็กน้อย จึงไม่ได้ทำการศึกษาในการเปลี่ยนระยะต่อไป



รูปที่ 4.22 ทิศทางการเปลี่ยนตำแหน่งการติดตั้งครีบริยงกระแสรองตามแนวแกน

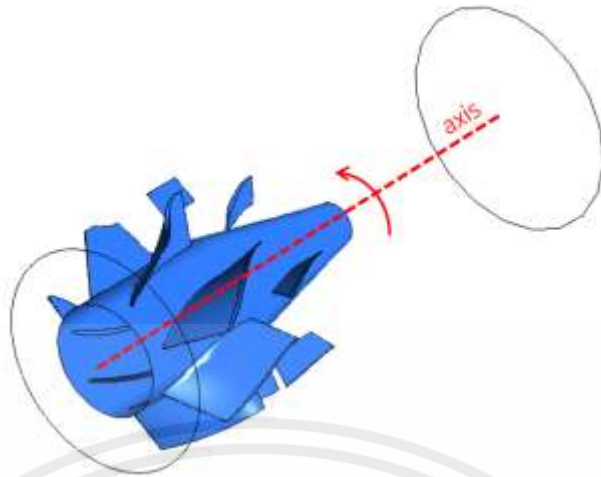
ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพ เฮดและแรงบิดของครีบริยงกระแสรอง เวอร์ชัน 1 ที่ติดตั้งในระยะ 0.65 m และ 0.70 m

	Splitter vane v.1	
	0.65 [m]	0.70 [m]
ประสิทธิภาพ [%]	80.596	80.596
เฮด [m]	3.751	3.744
แรงบิด [N-m]	57.115	57.004

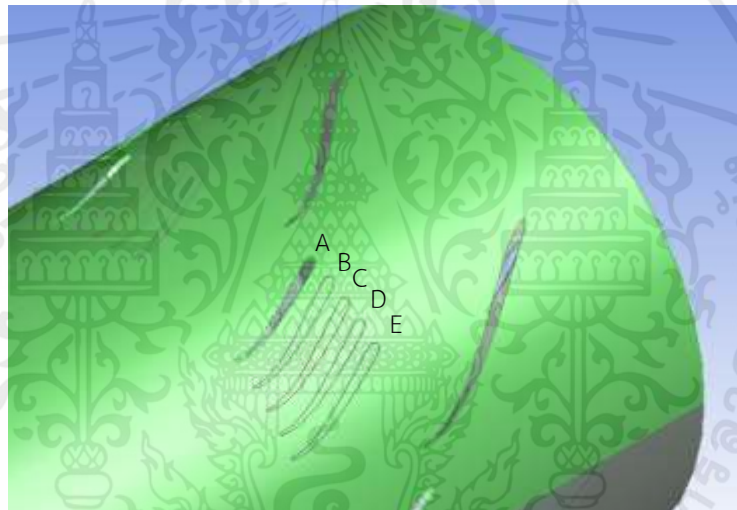
4.3.3.2 เปลี่ยนตำแหน่งตามแนวรัศมี

ผู้พัฒนาได้ทำแบบจำลองโดยเปลี่ยนระยะการติดตั้งครีบริยงกระแสจากตอนเริ่มแรกที่ติดตั้งให้อยู่ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างครีบริยงกระแสหลักและมีทิศทางดังแสดงในรูปที่ 4.23 โดยกำหนดตำแหน่งการติดตั้งเป็น A, B, C, D, E ดังรูปที่ 4.24 โดยที่ระยะกึ่งกลางอยู่ระหว่างตำแหน่ง C กับ D ได้ผลจากการศึกษาดังตารางที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 ทิศทางการเปลี่ยนตำแหน่งการติดตั้งครีบริยงกระแสน้ำรองตามแนวรัศมี



รูปที่ 4.24 ตำแหน่งการติดตั้งครีบริยงกระแสน้ำรองตามแนวรัศมีที่ A, B, C, D และ E

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพ เหน็ดและแรงบิดของครีบริยงกระแสน้ำรอง
เวอร์ชัน 1 ติดตั้งตามแนวรัศมีตำแหน่ง A, B, C, D และ E

	Splitter vane v.1					
	Original	A	B	C	D	E
ประสิทธิภาพ [%]	80.596	80.508	80.581	80.612	80.616	80.580
เหน็ด [m]	3.751	3.740	3.750	3.752	3.753	3.743
แรงบิด [N-m]	57.115	57.003	57.114	57.113	57.127	57.003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการหาค่าประสิทธิภาพที่ตำแหน่ง A, B, C, D และ E ทำให้ไม่ได้หาในตำแหน่งถัดไปอีก เนื่องจากมีแนวโน้มที่ค่าประสิทธิภาพจะลดลงเมื่อติดครีบเรียงกระแสน้ำรองในบริเวณใกล้กับครีบเรียงกระแสน้ำหลัก แต่ตำแหน่งในการติดตั้งครีบเรียงกระแสน้ำรองนี้ได้จากการทำแบบจำลองทำให้เห็นว่าไม่ได้ส่งผลมากกับค่าประสิทธิภาพ เฮด และแรงบิด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการทดสอบ การวิเคราะห์ผล และการคำนวณ

5.1 ขั้นตอนการคำนวณ

5.1.1 การคำนวณประสิทธิภาพโดยรวม

ในการดูว่าการทำงานของเครื่องสูบน้ำพญานาค่าสามารถทำงานได้ดีหรือไม่นั้น จะดูได้จากค่าประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำและการจะได้มาซึ่งค่าประสิทธิภาพนั้น จำเป็นจะต้องทราบค่าของตัวแปรต่างๆ ที่เกิดขึ้นขณะใช้งานเครื่องสูบน้ำ เพื่อนำมาคำนวณประกอบกันเป็นค่าประสิทธิภาพ โดยค่าของตัวแปรต่างๆ จะถูกนำมาคำนวณ ดังนี้

- การคำนวณหาความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์
- การคำนวณหาความเร็วของของไหล
- การคำนวณหาเฮดของเครื่องสูบน้ำ
- การคำนวณหาประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำ

5.1.2 การคำนวณหาความคลาดเคลื่อนของประสิทธิภาพ

ในทุกๆ การทำการทดสอบ จะพบว่ามีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น เนื่องจากความไม่คงที่ที่เกิดขึ้นในระบบและอุปกรณ์ที่ใช้ทำการทดสอบ ซึ่งจะนำค่าตัวแปรที่ทำการบันทึกผลมาคำนวณเพื่อหาความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในการทำการทดสอบนั้นๆ ได้ดังนี้

- การคำนวณหาความคลาดเคลื่อนของแรงบิดของมอเตอร์
- การคำนวณหาความคลาดเคลื่อนของความเร็วรอบของมอเตอร์
- การคำนวณหาความคลาดเคลื่อนของอัตราการไหลของของไหล
- การคำนวณหาความคลาดเคลื่อนของเฮดของเครื่องสูบน้ำ
- การคำนวณหาความคลาดเคลื่อนของค่าประสิทธิภาพน้ำ

5.1.3 การคำนวณเพื่อสร้างกราฟ Dimensionless performance curve

เพื่อลดปัจจัยย่อยต่างๆ ที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำ เช่น ความขรุขระบนผิว ความโค้ง มุมเข้า-ออก ของใบพัด เป็นต้น จะสามารถทำได้โดยเปลี่ยนค่าต่างๆ ที่คำนวณได้นั้นให้อยู่ในรูปไร้หน่วย ซึ่งจำแนกได้ดังนี้

- การคำนวณหา Flow coefficient
- การคำนวณหา Head coefficient

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การคำนวณหา Power coefficient

5.1.4 การคำนวณหาประเภทของเครื่องสูบน้ำ

เครื่องสูบน้ำสามารถกำหนดรูปแบบได้จากลักษณะการใช้งาน ลักษณะของการไหลที่เกิดขึ้นภายใน ซึ่งสามารถระบุได้จากการคำนวณหาค่าความเร็วจำเพาะ (Specific speed, N_s)

5.2 ตัวอย่างการคำนวณ

5.2.1 การคำนวณหาประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องสูบน้ำ

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบความเร็วรอบมอเตอร์ 1450 rpm ทั้ง 5 จุดทดสอบ

Test No.	N (rpm)	Q (m ³ /s)	Torque (N-m)	Pressure (bar)
1	1488	0.1525	142.0094	0.912949
2	1488	0.1534	141.0323	0.911769
3	1486	0.1546	142.9131	0.911275
4	1484	0.1503	145.2369	0.925307
5	1484	0.1502	145.3442	0.924064
6	1485	0.1501	144.7639	0.921880
7	1484	0.1458	145.8451	0.941315
8	1485	0.1485	146.1334	0.944027
9	1484	0.1475	145.8305	0.943642
10	1483	0.1424	149.3212	0.970415
11	1483	0.1409	149.3989	0.970144
12	1482	0.1441	149.1336	0.970080
13	1482	0.1421	152.5642	1.005889
14	1481	0.1415	152.3721	1.005157
15	1481	0.1430	152.6829	1.006053

ตารางที่ 5.2 ข้อมูลเบื้องต้นของการทดสอบ

ข้อมูลเบื้องต้น	จำนวน	หน่วย
ความหนาแน่นของน้ำที่ 28 °C	996.2	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
พื้นที่หน้าตัดท่อ	0.0523	เมตร ²
แรงโน้มถ่วง	9.81	เมตรต่อวินาที ²
สัมประสิทธิ์ทางเข้า	0.04	-
สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน	0.01127	-

- สมมติฐาน : 1. สภาวะคงที่
2. ของไหลอัดตัวไม่ได้

การคำนวณหาความเร็วของน้ำ (Velocity of Water)

$$v = \frac{Q}{A}$$

$$= \frac{0.1535 \text{ m}^3/\text{s}}{0.0523 \text{ m}^2}$$

$$v = 2.936 \text{ m/s}$$

การคำนวณเฮดเครื่องสูบน้ำ (Head pump)

Head pump คำนวณได้จากสมการพลังงาน เมื่อ $v_1=0$, $z_1 = -1.201$, $z_2 = -1.19$, $z_{m2}=0.306$

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 + H_p = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + \text{Total loss}$$

$$H_p = \left(\frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_{L_{\text{major}}} + h_{L_{\text{minor}}} \right) - \left(\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 \right)$$

$$H_p = \frac{P_2}{\rho g} + z_{m2} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 - z_1 + f \frac{L}{D} \frac{v_2^2}{2g} + K_L \frac{v_2^2}{2g}$$

$$H_p = \frac{0.912 \text{ bar} \times 10^5 \text{ Pa/bar}}{996.2 \text{ kg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2} + 0.306 \text{ m} + \frac{(2.936 \text{ m/s})^2}{2 \times 9.81 \text{ m/s}^2} + (-1.19 \text{ m} + 1.201 \text{ m})$$

$$+ \left[0.011255 \times \frac{0.322 \text{ m} \times (2.936 \text{ m/s})^2}{0.254 \text{ m} \times 2 \times 9.81 \text{ m/s}^2} \right] + \left[0.04 \times \frac{(2.936 \text{ m/s})^2}{2 \times 9.81 \text{ m/s}^2} \right]$$

$$H_p = 9.63808 + 0.439399 + 0.011 + 0.006269 + 0.017576 = 10.112 \text{ m}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาค่ากำลังที่เพลามอเตอร์ส่งให้ใบพัด (Shaft Power)

$$P_s = T \times \omega$$

$$P_s = 141.9849 \text{ N}\cdot\text{m} \times \frac{2\pi \times (1487.333)}{60} \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$P_s = 22114.6 \text{ Watt (22.114 kW)}$$

การคำนวณหาค่ากำลังที่ใบพัดส่งให้ของไหล (Output Power)

$$P_w = \rho g Q H_p$$

$$P_w = 996.2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 0.1535 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times 10.112 \text{ m}$$

$$P_w = 15180.511 \text{ Watt (15.180 kW)}$$

การคำนวณหาประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำ (Pump efficiency)

$$\eta_p = \frac{P_w}{P_s}$$

$$\eta_p = \frac{15.180 \text{ kW}}{22.114 \text{ kW}}$$

$$\eta_p = 0.6864 \text{ (68.64\%)}$$

5.2.2 การคำนวณหาความคลาดเคลื่อน

การคำนวณหาความคลาดเคลื่อนจะประกอบไปด้วย

1. Bias Error , B_x เป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้มาจากความละเอียดของเครื่องมือวัด ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามชนิดและรุ่นของเครื่องมือวัด
2. Precision Error , P_x เป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้มาจากการทดสอบหรือเก็บค่าซ้ำ โดยใช้ตาราง T-Student ในการคำนวณ โดยกำหนดให้มีเปอร์เซ็นต์ความเชื่อมั่นอยู่ที่ 95% ซึ่งค่า P_x สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$P_x = t_{v,p} S_{\bar{x}} \text{ (P\%)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย

$t_{v,p}$ หาได้จาก ตาราง T-Student ซึ่งจะมีค่าขึ้นอยู่กับ degree of freedom ($n - 1$) และค่าเปอร์เซ็นต์ความเชื่อมั่น (P%)

$S_{\bar{x}}$ คือ Standard deviation of the mean โดยที่ $S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}}$

S_x คือ Standard deviation

n คือ จำนวนครั้งของการทดสอบ

3. Uncertainty , U_x เป็นผลรวมของ Bias Error และ Precision Error

$$3.1) U_x = \sqrt{B_x^2 + P_x^2} \text{ สำหรับ Dependent Variable}$$

$$3.2) U_x = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \cdot \Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \cdot \Delta x_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_N} \cdot \Delta x_N\right)^2}$$

สำหรับ Independent Variable

รูปที่ 5.1 ค่า degree of freedom for Student's t Distribution

Critical Values for Student's t Distribution

one-tail area	0.250	0.125	0.100	0.075	0.050	0.025	0.010	0.005	0.0005
two-tail area	0.500	0.250	0.200	0.150	0.100	0.050	0.020	0.010	0.0010
df. \ c	0.500	0.750	0.800	0.850	0.900	0.950	0.980	0.990	0.999
1	1.000	2.414	3.078	4.165	6.314	12.706	31.821	63.657	636.619
2	0.816	1.604	1.886	2.282	2.920	4.303	6.965	9.925	31.599
3	0.765	1.423	1.638	1.924	2.353	3.182	4.541	5.841	12.924
4	0.741	1.344	1.533	1.778	2.132	2.776	3.747	4.604	8.610
5	0.727	1.301	1.476	1.699	2.015	2.571	3.365	4.032	6.869
6	0.718	1.275	1.440	1.650	1.943	2.447	3.143	3.707	5.959
7	0.711	1.254	1.415	1.617	1.895	2.365	2.998	3.499	5.408
8	0.706	1.240	1.397	1.592	1.860	2.306	2.896	3.355	5.041
9	0.703	1.230	1.385	1.574	1.833	2.262	2.821	3.250	4.781
10	0.700	1.221	1.372	1.559	1.812	2.228	2.764	3.169	4.587
11	0.697	1.214	1.363	1.548	1.796	2.201	2.718	3.106	4.437
12	0.695	1.209	1.356	1.538	1.782	2.179	2.681	3.055	4.318
13	0.694	1.204	1.350	1.530	1.771	2.160	2.650	3.012	4.221
14	0.692	1.200	1.345	1.523	1.761	2.145	2.624	2.977	4.140
15	0.691	1.197	1.341	1.517	1.753	2.131	2.602	2.947	4.073
16	0.690	1.194	1.337	1.512	1.746	2.120	2.583	2.921	4.015
17	0.689	1.191	1.333	1.508	1.740	2.110	2.567	2.898	3.965
18	0.688	1.189	1.330	1.504	1.734	2.101	2.552	2.878	3.922
19	0.688	1.187	1.328	1.500	1.729	2.093	2.539	2.861	3.883
20	0.687	1.185	1.325	1.497	1.725	2.086	2.528	2.845	3.850
21	0.686	1.183	1.323	1.494	1.721	2.080	2.518	2.831	3.819
22	0.686	1.182	1.321	1.492	1.717	2.074	2.508	2.819	3.792
23	0.685	1.180	1.319	1.489	1.714	2.069	2.500	2.807	3.768
24	0.685	1.179	1.318	1.487	1.711	2.064	2.492	2.797	3.745
25	0.684	1.198	1.316	1.485	1.708	2.060	2.485	2.787	3.725
26	0.684	1.177	1.315	1.483	1.706	2.056	2.479	2.779	3.707
27	0.684	1.176	1.314	1.482	1.703	2.052	2.473	2.771	3.690
28	0.683	1.175	1.313	1.480	1.701	2.048	2.467	2.763	3.674
29	0.683	1.174	1.311	1.479	1.699	2.045	2.462	2.756	3.659
30	0.683	1.173	1.310	1.477	1.697	2.042	2.457	2.750	3.646
35	0.682	1.170	1.306	1.472	1.690	2.030	2.438	2.724	3.591
40	0.681	1.167	1.303	1.468	1.684	2.021	2.423	2.704	3.551
45	0.680	1.165	1.301	1.465	1.679	2.014	2.412	2.690	3.520
50	0.679	1.164	1.299	1.462	1.676	2.009	2.403	2.678	3.496
60	0.679	1.162	1.296	1.458	1.671	2.000	2.390	2.660	3.460
70	0.678	1.160	1.294	1.456	1.667	1.994	2.381	2.648	3.435
80	0.678	1.159	1.292	1.453	1.664	1.990	2.374	2.639	3.416
100	0.677	1.157	1.290	1.451	1.660	1.984	2.364	2.626	3.390
500	0.675	1.152	1.283	1.442	1.648	1.965	2.334	2.586	3.310
1000	0.675	1.151	1.282	1.441	1.646	1.962	2.330	2.581	3.300
∞	0.674	1.150	1.282	1.440	1.645	1.960	2.326	2.576	3.291

For degrees of freedom *df.* not in the table, use the closest *df.* that is smaller.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแสดงตัวอย่างการคำนวณ Uncertainty ใช้ค่าของความเร็วรอบมอเตอร์ที่ 1450 rpm (motor 40 Hp, 30 kW) และปรับอัตราการใช้โหลดสูงสุด จากข้อมูลการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง

เมื่อ degree of freedom เท่ากับ $n - 1$ ซึ่งเท่ากับ 2 และกำหนดเปอร์เซ็นต์ความเชื่อมั่นอยู่ที่ 95 ได้ค่า $t_{v,p} = 4.303$ ซึ่งหาได้จากตาราง Student's t Distribution ค่าเหล่านี้จะนำไปคำนวณหา Uncertainty ซึ่งจะแสดงในส่วนถัดไป

การคำนวณหาความคลาดเคลื่อนของแรงบิดของมอเตอร์

จากสมการ Uncertainty ของแรงบิด (T)

$$U_T = \sqrt{B_T^2 + P_T^2}$$

เมื่อ B_T เท่ากับ 0.2 จากตารางสอบเทียบเครื่องมือ อ้างอิงจากภาคผนวก ข

P_T เท่ากับ 3.293677 จากการนำข้อมูลการทดสอบมาหาค่าความคลาดเคลื่อนโดยใช้ตาราง

T-Student

จะได้ $t_{v,p} = 4.303$ และค่า Standard deviation of the mean = 0.765437

$$U_T = \sqrt{0.2^2 + 3.293677^2}$$

$$U_T = \pm 3.299744 \text{ N}\cdot\text{m}$$

การคำนวณหาความคลาดเคลื่อนของความเร็วรอบของมอเตอร์

จากสมการ Uncertainty ของความเร็วรอบ (N)

$$U_N = \sqrt{B_N^2 + P_N^2}$$

เมื่อ B_N เท่ากับ 0.3 จากตารางสอบเทียบเครื่องมือ อ้างอิงจากภาคผนวก ข

P_N เท่ากับ 3.513385 จากการนำข้อมูลการทดสอบมาหาค่าความคลาดเคลื่อนโดยใช้ตาราง

T-Student

จะได้ $t_{v,p} = 4.303$ และค่า Standard deviation of the mean = 0.816497

$$U_N = \sqrt{0.3^2 + 3.513385^2}$$

$$U_N = \pm 3.52617 \text{ rpm}$$

จากสมการ Uncertainty ของความเร็วเชิงมุม (ω)

$$U_\omega = \sqrt{\left(\frac{\partial \omega}{\partial n} \cdot U_N\right)^2}$$

$$U_\omega = \sqrt{\left(\frac{2\pi}{60} \cdot U_N\right)^2}$$

$$U_\omega = \sqrt{\left(\frac{2\pi}{60} \cdot 3.52617\right)^2}$$

$$U_\omega = \pm 0.36926 \text{ rad/s}$$

การคำนวณหาความคลาดเคลื่อนของอัตราการไหลของของไหล

จากสมการ Uncertainty ของอัตราการไหล (Q)

$$U_Q = \sqrt{B_Q^2 + P_Q^2}$$

เมื่อ B_Q เท่ากับ 0.02 จากตารางสอบเทียบเครื่องมือ อ้างอิงจากภาคผนวก ข

P_Q เท่ากับ 0.003206 จากการนำข้อมูลการทดสอบมาหาค่าความคลาดเคลื่อนโดยใช้ตาราง T-Student

จะได้ $t_{v,p} = 4.303$ และค่า Standard deviation of the mean = 0.000744983

$$U_Q = \sqrt{0.02^2 + 0.003206^2}$$

$$U_Q = \pm 0.020255 \text{ m}^3/\text{s}$$

การคำนวณหาความคลาดเคลื่อนของเฮดเครื่องสูบน้ำ

จากสมการ Uncertainty ของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (d) โดยใช้ตลับเมตรในการวัด

$$U_d = \frac{\text{Resolution}}{2}$$

$$U_d = \frac{0.001}{2}$$

$$U_d = \pm 0.0005 \text{ m}$$

จากสมการ Uncertainty ของพื้นที่หน้าตัดของท่อ (A)

$$U_A = \sqrt{\left(\frac{\partial A}{\partial d} \cdot U_d\right)^2}$$

$$U_A = \sqrt{\left(\frac{\pi \times d}{2} \cdot U_d\right)^2}$$

$$U_A = \sqrt{\left(\frac{\pi \times 0.258}{2} \cdot 0.0005\right)^2}$$

$$U_A = \pm 2.0263 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

จากสมการ Uncertainty ของความเร็วของของไหล (v)

$$U_v = \sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial Q} \cdot U_Q\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial A} \cdot U_A\right)^2}$$

$$U_v = \sqrt{\left(\frac{1}{A} \cdot U_Q\right)^2 + \left(\frac{Q}{A^2} \cdot U_A\right)^2}$$

$$U_v = \sqrt{\left(\frac{1}{0.0523} \times 0.0202055\right)^2 + \left(\frac{0.1535}{0.0523^2} \times 0.00020263\right)^2}$$

$$U_v = \pm 0.38745 \text{ m/s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ Uncertainty ของ Velocity head (H_V)

$$U_{H_V} = \sqrt{\left(\frac{\partial H_V}{\partial V} \cdot U_V\right)^2}$$

$$U_{H_V} = \sqrt{\left(\frac{V}{g} \cdot U_V\right)^2}$$

$$U_{H_V} = \sqrt{\left(\frac{2.936}{9.81} \cdot 0.38745\right)^2}$$

$$U_{H_V} = \pm 0.11596 \text{ m}$$

จากสมการ Uncertainty ของความดัน (P)

$$U_P = \sqrt{B_P^2 + P_P^2}$$

เมื่อ B_P เท่ากับ 0.25 จากตารางสอบเทียบเครื่องมือ อ้างอิงจากภาคผนวก ข

P_P เท่ากับ 0.010239 จากการนำข้อมูลการทดสอบมาหาค่าความคลาดเคลื่อนโดยใช้ตาราง T-Student

จะได้ $t_{v,P} = 4.303$ และค่า Standard deviation of the mean = 0.002379483

$$U_P = \sqrt{0.25^2 + 0.010239^2}$$

$$U_P = 0.250209 \text{ bar}$$

$$U_P = \pm 25020.9 \text{ Pa}$$

จากสมการ Uncertainty ของ Discharge head (H_d)

$$U_{H_d} = \sqrt{\left(\frac{\partial H_d}{\partial P} \cdot U_P\right)^2}$$

$$U_{H_d} = \sqrt{\left(\frac{1}{\rho g} \cdot U_P\right)^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$U_{H_d} = \sqrt{\left(\frac{1}{996.2 \times 9.81} \cdot 25020.9\right)^2}$$

$$U_{H_d} = \pm 2.5602 \text{ m}$$

จากสมการ Uncertainty ของ Loss head (H_L)

$$U_{H_L} = \sqrt{\left(\frac{\partial H_L}{\partial V} \cdot U_V\right)^2}$$

$$U_{H_L} = \sqrt{\left(\frac{(\Sigma K) \bar{V}}{g} \cdot U_V\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0.04 \times 2.936}{9.81} \cdot 0.38745\right)^2}$$

$$U_{H_L} = \pm 0.004638 \text{ m}$$

จากสมการ Uncertainty ของ Head pump (H_p)

$$U_{H_p} = \sqrt{\left(\frac{\partial H_p}{\partial H_V} \cdot U_{H_V}\right)^2 + \left(\frac{\partial H_p}{\partial H_d} \cdot U_{H_d}\right)^2 + \left(\frac{\partial H_p}{\partial H_L} \cdot U_{H_L}\right)^2}$$

$$U_{H_p} = \sqrt{(1 \times 0.11596)^2 + (1 \times 2.5602)^2 + (1 \times 0.004638)^2}$$

$$U_{H_p} = \pm 2.5628 \text{ m}$$

ค่าความคลาดเคลื่อนของประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำ

จะสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$U_{\eta_p} = \sqrt{\left(\frac{\partial \eta_p}{\partial T} \cdot U_T\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_p}{\partial \omega} \cdot U_\omega\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_p}{\partial Q} \cdot U_Q\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_p}{\partial H_p} \cdot U_{H_p}\right)^2}$$

$$U_{\eta_p} = \sqrt{\left(\frac{\rho g Q H_p}{T^2 \omega} \cdot U_T\right)^2 + \left(\frac{\rho g Q H_p}{T \omega^2} \cdot U_\omega\right)^2 + \left(\frac{\rho g Q H_p}{T \omega} \cdot U_Q\right)^2 + \left(\frac{\rho g Q}{T \omega} \cdot U_{H_p}\right)^2}$$

$$U_{\eta_p} = 0.02391 = \pm 2.39\% \text{ (จากตารางที่ 3.5 สามารถสรุปได้ว่าค่าความ}$$

คลาดเคลื่อนของประสิทธิภาพ อยู่ใน Grade 1 สำหรับมาตรฐานของ JIS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดสอบแต่ละอัตราการไหลนั้นได้มีการนำค่าตัวแปรที่ได้จากการบันทึกผลการทดสอบ มาคำนวณหาความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำการทดสอบนั้นๆ ดังตัวอย่างที่แสดงข้างต้น โดยมีการแสดงตัวอย่างการคำนวณหาความคลาดเคลื่อนของแรงบิดมอเตอร์ ความคลาดเคลื่อนของความเร็วรอบของมอเตอร์ ความคลาดเคลื่อนของอัตราการไหลของของไหลเสดของเครื่องสูบน้ำ และความคลาดเคลื่อนของค่าประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำ

การคำนวณหา Flow Coefficient

$$\begin{aligned}\pi_Q &= \frac{Q}{ND^3/B^{0.5}} \\ &= \frac{0.1535 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{\left[\left(\frac{1487.333 \text{ rev}}{\text{min}} \times \frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}} \times \frac{\text{min}}{60 \text{ s}}\right) \times (0.258 \text{ m})^3\right]/8^{0.5}} \\ \pi_Q &= 0.1623\end{aligned}$$

การคำนวณหา Head Coefficient

$$\begin{aligned}\pi_H &= \frac{gH_p}{N^2D^2/B} \\ &= \frac{(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}) \times (10.154 \text{ m})}{\left[\left(\frac{1487.333 \text{ rev}}{\text{min}} \times \frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}} \times \frac{\text{min}}{60 \text{ s}}\right)^2 \times (0.258 \text{ m})^2\right]/8} \\ \pi_H &= 0.4935\end{aligned}$$

การคำนวณหา Power Coefficient

$$\begin{aligned}\pi_P &= \frac{P_s}{\rho N^3 D^5 / B^{1.5}} \\ &= \frac{22.114 \text{ kW}}{\left[(996.2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}) \times \left(\frac{1487.333 \text{ rev}}{\text{min}} \times \frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}} \times \frac{\text{min}}{60 \text{ s}}\right)^3 \times (0.258 \text{ m})^5\right]/8^{1.5}} \\ \pi_P &= 1.163 \times 10^{-4}\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาประเภทของเครื่องสูบน้ำ

$$N_s = \frac{NQ^{0.5}}{(gH_p)^{0.75}}$$

$$= \frac{\left(\frac{1487.333 \text{ rev}}{\text{min}} \times \frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}} \times \frac{\text{min}}{60 \text{ s}}\right) \times (0.1535 \frac{\text{m}^3}{\text{s}})^{0.5}}{\left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 10.112 \text{ m}\right)^{0.75}}$$

$$N_s = 1.94$$

จากรูปที่ 2.4 สามารถสรุปได้ว่าเครื่องสูบน้ำจัดอยู่ในประเภท Mixed-flow pump

5.3 ผลการทดสอบของเครื่องสูบน้ำ 5 จุดทดสอบ

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบที่ความเร็วรอบ 1450 rpm

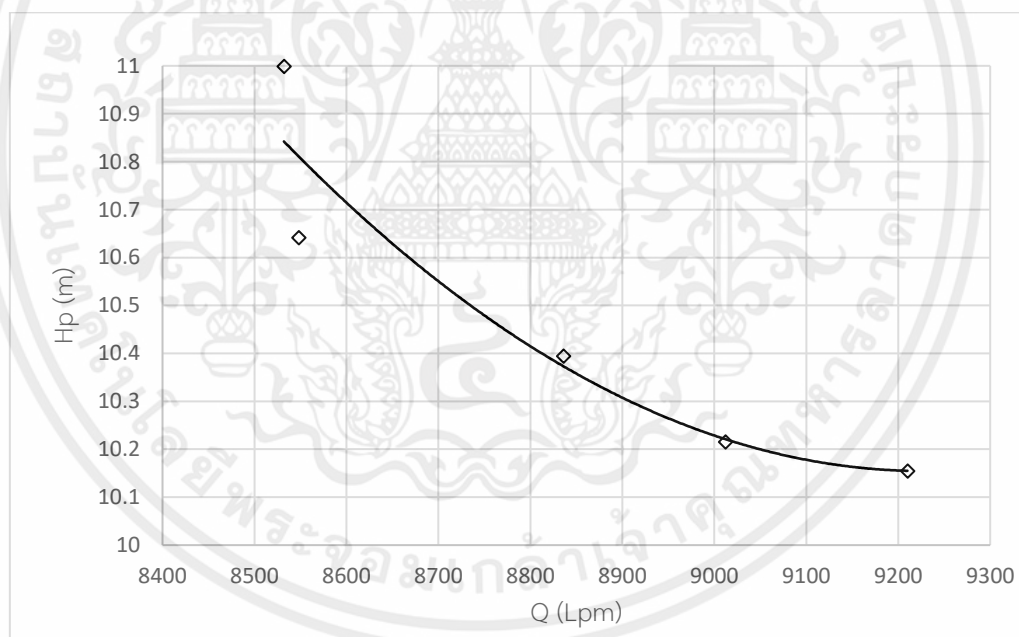
Test No.	static head	dynamic head	potential head	total loss	head pump	Ps (kW)	Pv (kW)	η_{hp}	%
1	9.77159	0.43369	-0.004	0.02345	10.22473	22.1283	15.2383	0.68863	68.863
2	9.75935	0.43883	0.019	0.02372	10.11728	21.9761	15.1672	0.69017	69.017
3	9.75423	0.44572	0.019	0.02408	10.11948	22.2392	15.2891	0.68749	68.749
4	9.89972	0.42127	0.013	0.02279	10.23132	22.5704	15.0282	0.66584	66.584
5	9.88683	0.42071	0.013	0.02276	10.21801	22.5871	14.9986	0.66404	66.404
6	9.86419	0.42015	0.014	0.02273	10.19608	22.5121	14.9565	0.66438	66.438
7	10.06569	0.39642	0.013	0.02147	10.36896	22.6649	14.7743	0.65186	65.186
8	10.09381	0.41124	0.012	0.02226	10.41131	22.7250	15.1094	0.66488	66.488
9	10.08982	0.40572	0.011	0.02197	10.40056	22.6627	14.9922	0.66154	66.154
10	10.36740	0.37815	0.009	0.02050	10.64349	23.1895	14.8119	0.63873	63.873
11	10.36459	0.37022	0.009	0.02008	10.63237	23.2016	14.6405	0.63101	63.101
12	10.36393	0.38723	0.007	0.02099	10.64762	23.1447	14.9945	0.64786	64.786
13	10.73520	0.37656	0.004	0.02042	10.99980	23.6772	15.2755	0.64516	64.516
14	10.72761	0.37338	0.003	0.02025	10.98797	23.6314	15.1946	0.64298	64.298
15	10.73690	0.38134	0.004	0.02067	11.00652	23.6796	15.3816	0.64957	64.957

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.4 ค่าความคลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์

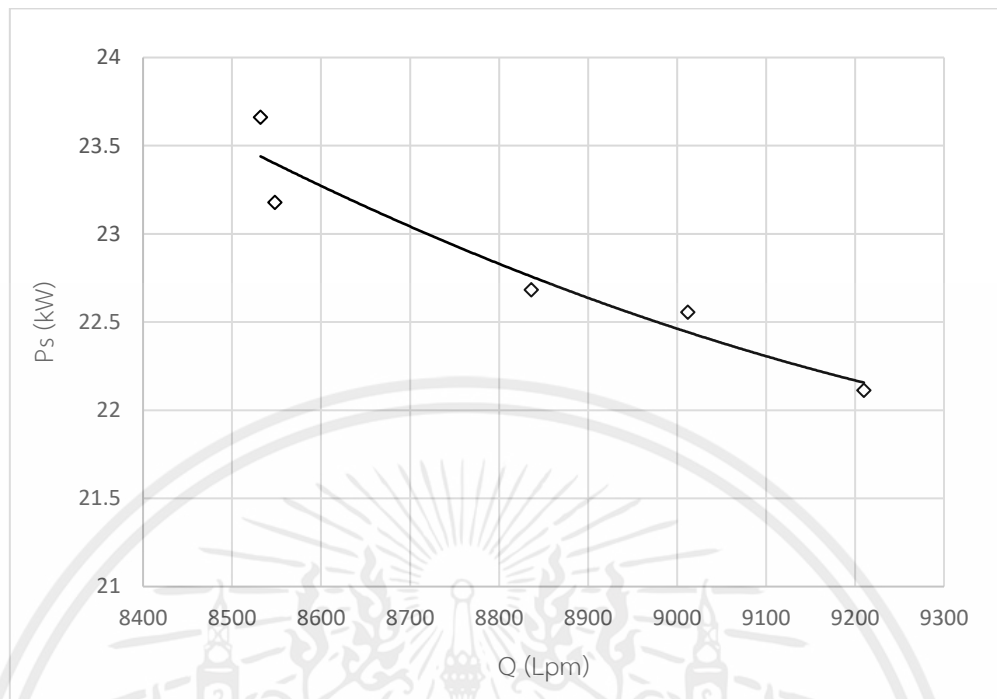
Uncertainty of Tools	จุดที่ทดสอบ					Grade of JIS B 8301
	วาล์ว เปิดสุด	ปรับอัตรา การไหล ครั้งที่ 1	ปรับอัตรา การไหล ครั้งที่ 2	ปรับอัตรา การไหล ครั้งที่ 3	ปรับอัตรา การไหล ครั้งที่ 4	
Torque (N-m)	±3.300	±2.765	±2.700	±3.083	±2.790	2
Pressure (bar)	±0.250	±0.250	±0.250	±0.250	±0.250	-
Q (m ³ /s)	±0.020	±0.020	±0.020	±0.021	±0.020	1
N (rpm)	±3.526	±1.782	±1.782	±1.782	±2.021	3

5.4 กราฟแสดงสมรรถนะของเครื่องสูบน้ำ

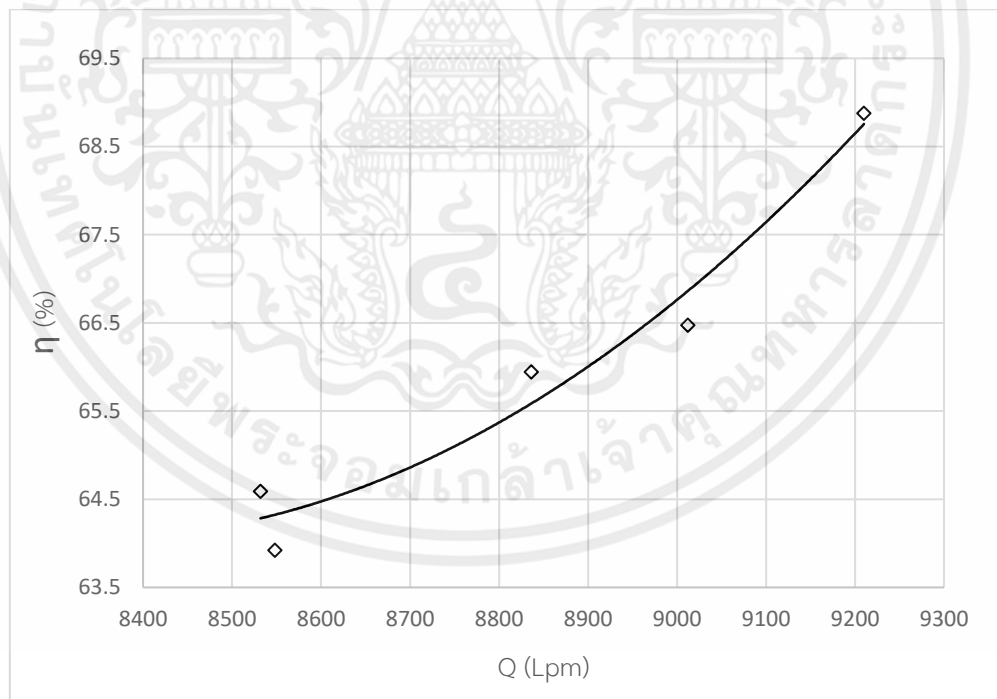


(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

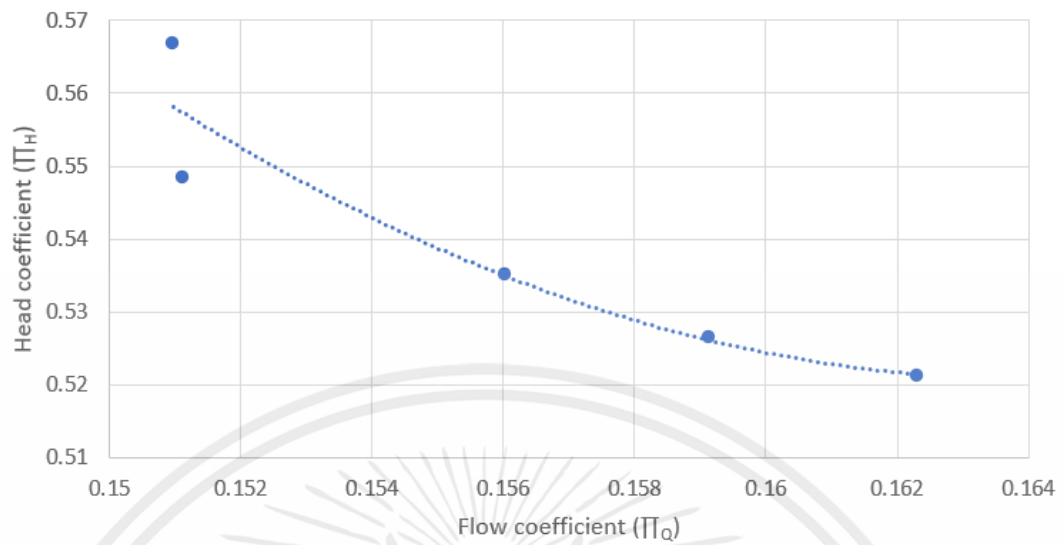


(ค)

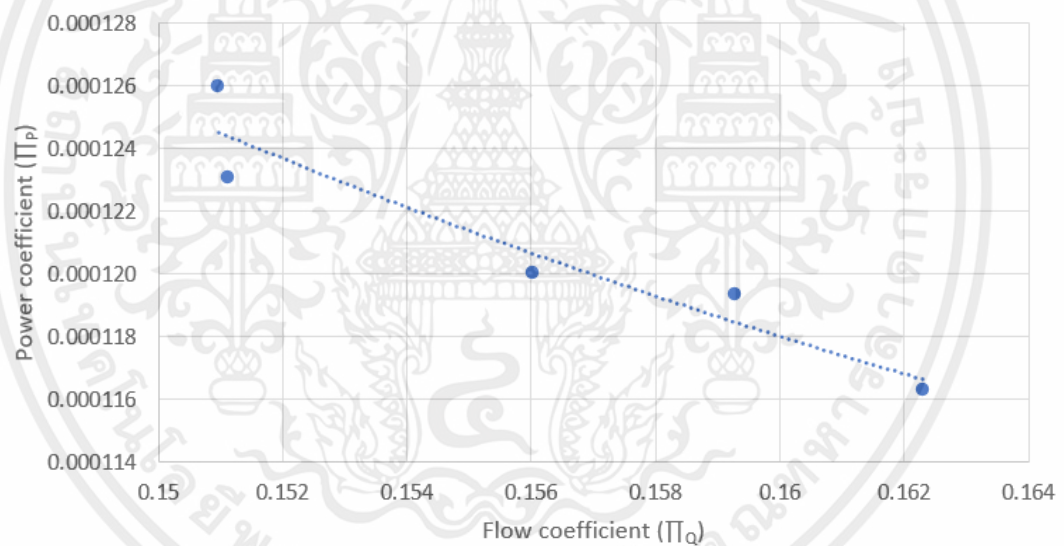
รูปที่ 5.2 กราฟสมรรถนะการทำงานของเครื่องสูบน้ำที่ความเร็วรอบ 1450 รอบต่อวินาที

(ก) Q - H (ข) Q - P_s (ค) Q - η

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

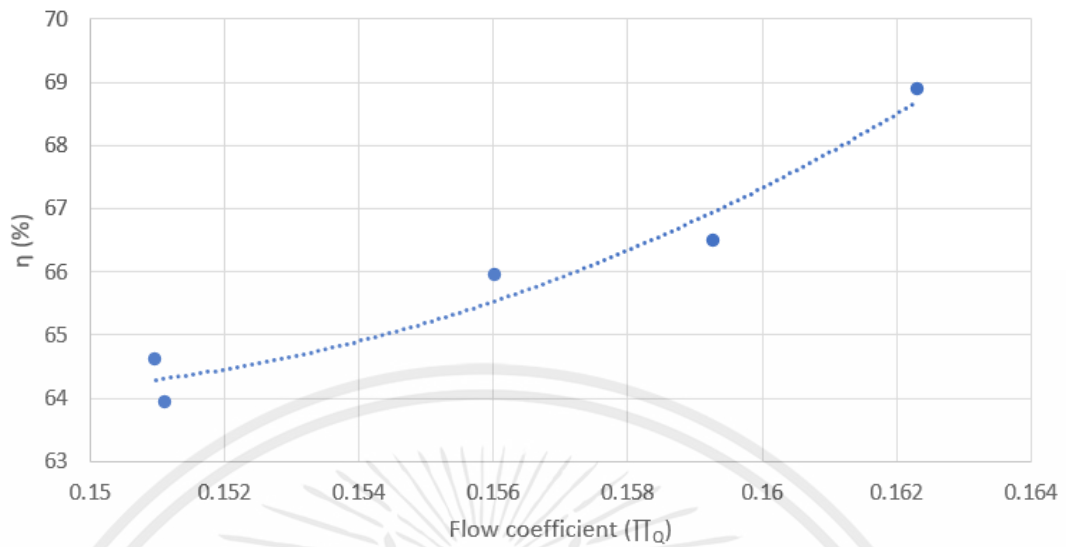


(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

รูปที่ 5.3 กราฟสมรรถนะการทำงานของเครื่องสูบน้ำแบบไร้มิติ (Dimensionless)

(ก) $\pi_Q - \pi_H$ (ข) $\pi_Q - \pi_P$ (ค) $\pi_Q - \eta$

5.5 การสอบเทียบ weir

การสอบเทียบ weir เพื่อการหาอัตราการไหลของเครื่องสูบน้ำซึ่งสามารถทำได้โดยการวัดเสถียรภาพความสูงของน้ำจากปลายรอยบากของ weir จนถึงระดับผิวน้ำ และนำค่าความสูงเสถียรมาคำนวณหาอัตราการไหลแล้วนำมาเปรียบเทียบกับอัตราการไหลที่ได้จาก electromagnetic flow meter เพื่อหาความคลาดเคลื่อน โดยมีผลการสอบเทียบดังนี้

ตารางที่ 5.5 ผลการสอบเทียบ weir กับ electromagnetic flow meter ก่อนการปรับสมการ

Head weir (m)	Flow rate (L/s)	Electromagnetic flow meter (L/s)	% error
0.385	126.9202	158.7	20.03
0.384	126.0977	152.3	17.20
0.386	127.7460	153.4	16.72
0.385	126.9202	154.6	17.90
0.378	121.2296	150.3	19.34
0.377	120.4294	150.2	19.82
0.378	121.2296	150.1	19.23
0.375	118.8385	145.8	18.49
0.375	118.8385	148.5	19.97
0.374	118.0479	147.5	19.97
0.369	114.1419	142.4	19.84
0.368	113.3701	140.9	19.54
0.368	113.3701	144.1	21.33
0.364	110.3145	142.1	22.37
0.363	109.5584	141.5	22.57
0.362	108.8054	143	23.91
0.349	99.2985	133.7	25.73
0.345	96.4777	126.8	23.91
0.34	93.0200	122.1	23.82
0.336	90.3082	121.5	25.67
0.331	86.9859	117.9	26.22

จากผลการสอบเทียบพบว่าสมการที่ใช้ในการการคำนวณอัตราการไหลของ weir นั้นมีค่าความคลาดเคลื่อนมากเกินไป เนื่องจากสมการที่ใช้เป็นสมการทั่วไปที่ไม่ได้มีการกำหนดเงื่อนไข ขอบเขต และขนาดของ weir ที่นำมาใช้ในการคำนวณ จึงต้องมีการปรับสมการให้มีความเหมาะสมกับการทดสอบโดยมีวิธีการดังนี้

จากสมการการหาอัตราการไหลสำหรับ 90° V-notch weir

$$Q = 1380 H_m^{2.5}$$

กำหนดให้เป็น

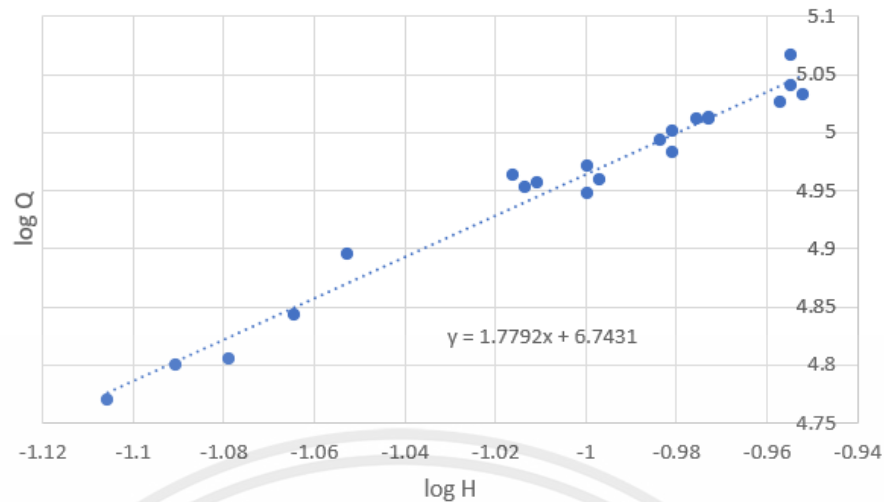
$$Q = K_1 H^{K_2}$$

ทำการ take log ทั้งสองข้าง

$$\log Q = \log K_1 + K_2 \log H$$

เมื่อจัดให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น $y = a_0 + a_1 x$ จะได้ว่า $a_0 = \log K_1$, $a_1 = K_2$, $x = \log H$ และ $y = \log Q$ ซึ่งกระบวนการเหล่านี้สามารถทำได้ด้วยการนำข้อมูลระหว่าง $\log H$ และ $\log Q$ มาพล็อตเป็นข้อมูลกระจายและกำหนดการพล็อตให้เป็นเชิง linear

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง log H และ log Q

จากสมการจะได้ $a_0 = \log K_1 = 6.7431$ และ $a_1 = K_2 = 1.7792$ ดังนั้น $K_1 = 848.186$ และ $K_2 = 1.7792$ เมื่อนำไปแทนค่าในสมการจะได้

$$Q = 848.186 H_m^{1.7792}$$

ตารางที่ 5.6 ผลการสอบเทียบ weir กับ electromagnetic flow meter
หลังการปรับสมการ

Head weir (m)	Flow rate (L/s)	Electromagnetic flow meter (L/s)	% error
0.385	155.2183	158.7	2.19
0.384	154.5017	152.3	1.45
0.386	155.9363	153.4	1.65
0.385	155.2183	154.6	0.40
0.378	150.2327	150.3	0.04
0.377	149.5263	150.2	0.45
0.378	150.2327	150.1	0.09
0.375	148.1179	145.8	1.59
0.375	148.1179	148.5	0.26
0.374	147.4159	147.5	0.06
0.369	143.9277	142.4	1.07
0.368	143.2345	140.9	1.66
0.368	143.2345	144.1	0.60
0.364	140.4762	142.1	1.14
0.363	139.7903	141.5	1.21
0.362	139.1059	143	2.72
0.349	130.3425	133.7	2.51
0.345	127.6965	126.8	0.71
0.34	124.4224	122.1	1.90
0.336	121.8299	121.5	0.27
0.331	118.6231	117.9	0.61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นการจัดทำขึ้นเพื่อศึกษาวิธีการเชิงทดสอบเครื่องสูบน้ำพญานาคขนาด 10 นิ้ว เพื่อการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำ ศึกษาสาเหตุและหาแนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำด้วยวิธีการทางคอมพิวเตอร์ โดยการปรับปรุงลักษณะของครีบริยงกระแสน้ำ ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังนี้

6.1 สรุปผลการทดสอบที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 1450 rpm ทั้ง 5 จุดทดสอบ

ในการทดสอบเครื่องสูบน้ำทั้งหมด 5 จุด พบว่ามีจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด (BEP) อยู่ที่ 68.64 ± 2.36 % ที่ความสูง (เฮด) 10.112 เมตร ใช้กำลัง 22.114 กิโลวัตต์ และมีค่า specific speed (N_s) อยู่ที่ 1.94

จากการทดสอบและการคำนวณหาประสิทธิภาพนั้นพบเฮดรวมที่เครื่องสูบน้ำสร้างได้มีค่าเป็นที่น่าพอใจและบรรลุเป้าหมายที่ 8 เมตร แต่ค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่ทำได้นั้นไม่ถึงตามเป้าหมายที่ 75 % ซึ่งผู้ทดลองได้พบปัญหาในระหว่างการปรับอัตราการไหลด้วย globe valve และวิเคราะห์ได้ว่าสาเหตุที่ทำให้ค่าประสิทธิภาพได้ไม่เป็นไปตามเป้าหมายนั้นเกิดจากอัตราการไหลที่เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการหาค่าความหาค่าประสิทธิภาพนั้นมีค่าต่ำไป ซึ่งเกิดจากอากาศที่ถูกอันไว้้อยู่ภายใน clearance ของท่อและ globe valve ส่งผลให้น้ำไหลไม่เต็มท่ออันเป็นที่มาของอัตราการไหลที่ลดต่ำลงไปจากที่คาดการณ์ไว้ที่ 0.190 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

การทำแบบจำลองการปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำแบบไหลตามแนวแกน พบว่าการเปลี่ยนรูปทรงของครีบริยงกระแสน้ำหลักให้เป็นทรงไฮโดรฟอยล์ทำให้มีค่าประสิทธิภาพที่จุด BEP เพิ่มขึ้นจากเดิม +1.16% และการติดตั้งครีบริยงกระแสน้ำรองที่ ความหนาคงที่ทำให้ประสิทธิภาพ ที่จุด BEP ลดลง -2.66% และการติดตั้งครีบริยงกระแสน้ำรองบริเวณหลังครีบริยงกระแสน้ำหลัก ทั้งในแนวแกนและแนวรัศมีไม่ค่อยมีผลต่อค่าประสิทธิภาพที่จุด BEP เมื่อเทียบกับครีบริยงกระแสน้ำหลักทรงไฮโดรฟอยล์ค่าประสิทธิภาพลดลง -0.2%

6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 การทดสอบเครื่องสูบน้ำในชุดทดสอบภาคสนาม

จากการทดสอบเครื่องสูบน้ำแบบไหลตามแนวแกนที่ต่อใบพัดและครีบริยงกระแสะ 2 ชุด มีความผิดพลาดและข้อจำกัดในการทดสอบหลายประการ คือ

1. กระบวนการเก็บผลทดสอบที่อัตราการไหลค่าต่างๆ ผู้ทดสอบใช้การหรีวาล์วเป็นจำนวนรอบต่างๆ เพื่อหาอัตราการไหลที่แตกต่างกัน แต่ในการหรีวาล์วจำนวนรอบเท่ากันผู้ทดสอบเก็บผลได้อัตราการไหลค่าไม่เท่ากัน ซึ่งอาจเกิดจากแรงดันน้ำไหลดันให้วาล์วเปิดมากขึ้นจึงอ่านค่าอัตราการไหลได้แตกต่างจากเดิม ดังนั้นจึงควรใช้การหรีวาล์วให้ได้อัตราการไหลก่อนเก็บผลการทดสอบ

2. เครื่องมือวัดในชุดทดสอบมีปัญหาทำให้ผู้ทดสอบใช้วิธีเก็บค่าอัตราการไหลด้วยมือและไม่สามารถดูผลว่าเครื่องสูบน้ำเข้าสู่สภาวะคงที่แล้วหรือไม่

3. การเดินเครื่องสูบน้ำในรอบแรกผู้ทดสอบเปิดวาล์ว 100% และเมื่อเห็นระดับความสูงของบ่อนคงที่จึงเก็บผล และเมื่อทำการทดสอบที่อัตราการไหลอื่นๆ แล้วกลับมาเปิดวาล์ว 100% อีกครั้ง ผู้ทดสอบสังเกตว่าที่อัตราการไหลสูงสุดมีค่าเพิ่มมากขึ้น จึงสันนิษฐานว่าในท่อหรือในวาล์วนั้นยังมีอากาศหลงเหลืออยู่ทำให้อัตราการไหลน้อย และเมื่อทำการหรีวาล์วอากาศจึงถูกไล่ออกมา ดังนั้นก่อนการเก็บผลการทดสอบควรทำการหรีวาล์วก่อนทุกครั้ง

4. การทดสอบมีความล่าช้าเนื่องจากการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ และชุดใบพัดยังไม่เข้าที่ ส่งผลให้มีความล่าช้าไม่เพียงพอสำหรับความแม่นยำของผลการทดสอบ

6.2.2 การทำแบบจำลองเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพ

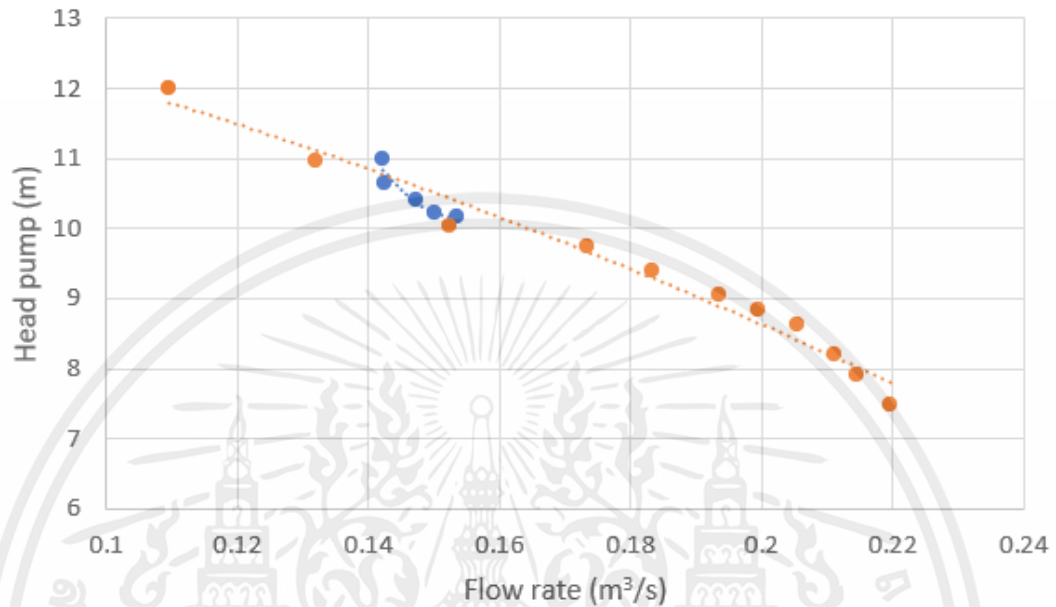
จากการทำแบบจำลองเครื่องสูบน้ำแบบไหลตามแนวแกนโดยพัฒนาตัวครีบริยงกระแสะน้ำ ในการทำแบบจำลองต่างๆ ต้องใช้เวลาในการหาผลประสิทธิภาพค่อนข้างนาน และสามารถปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ของครีบริยงกระแสะได้หลายแบบ ซึ่งผู้พัฒนายังไม่สามารถปรับเปลี่ยนได้ทุกแบบ อาทิ การเปลี่ยนความยาวหรือความสูงในแนวรัศมีของครีบริยงกระแสะน้ำร่อง และในการทำแบบจำลองยังไม่ได้มีการเปรียบเทียบค่าจากการทดสอบจริง

6.3 ผลการทดสอบเพิ่มเติม

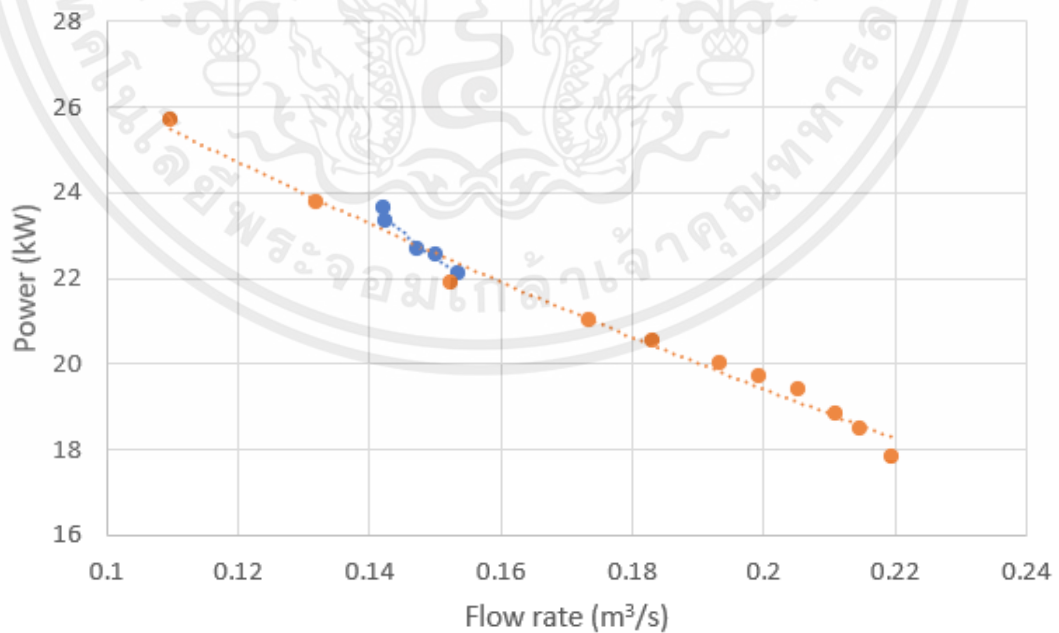
จากผลการทดสอบก่อนหน้าของเครื่องสูบน้ำที่ทดสอบบนชุดทดสอบภาคสนาม ซึ่งมีข้อจำกัดของอัตราการไหลที่ไม่สามารถทำได้ที่อัตราการไหลสูงๆ อันเนื่องมาจากข้อจำกัดของชุดทดสอบภาคสนาม ทำให้มีการเปลี่ยนอุปกรณ์ภายในชุดทดสอบเพื่อให้สามารถทดสอบสมรรถนะของเครื่องสูบน้ำได้ในย่านที่ออกแบบไว้ เมื่อทำการเปลี่ยนขนาดโกลบวาล์ว (Globe valve) จึงได้มีการเก็บผลทดสอบเพิ่มเติม ซึ่งผลการทดสอบเพิ่มเติมนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากคุณอุกฤษฏ์ คงเตี้ย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบเพิ่มเติมและผลการทดสอบเดิม ดังแสดงในรูปที่ 6.1 – 6.2

โดย สีส้ม คือ ค่าที่ได้จากการทดสอบเพิ่มเติม และสีน้ำเงิน คือ ค่าที่ได้จากการทดสอบเดิม

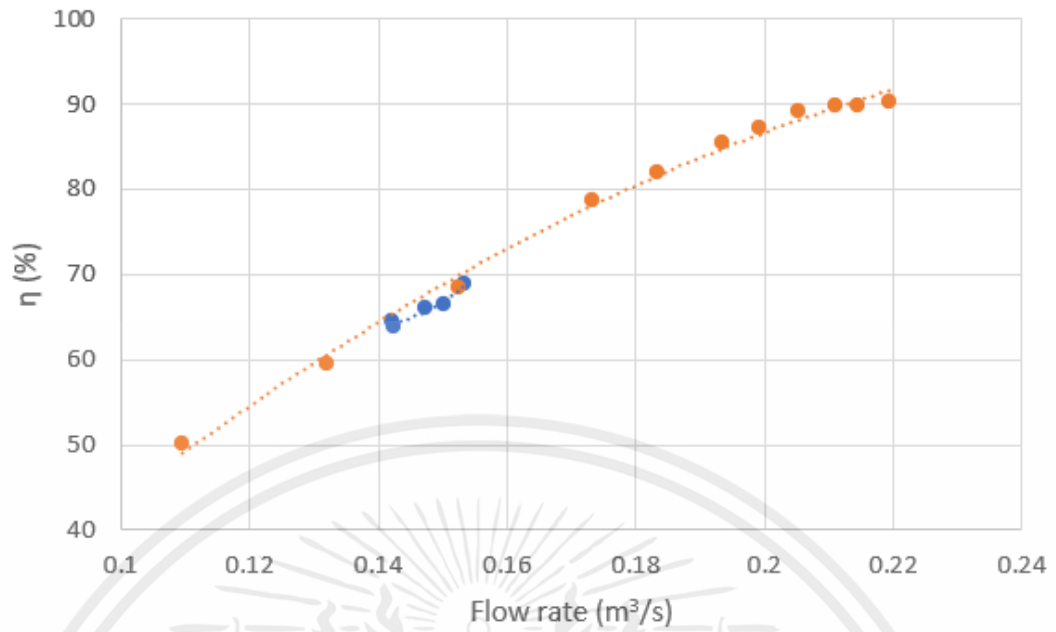


(ก)



(ข)

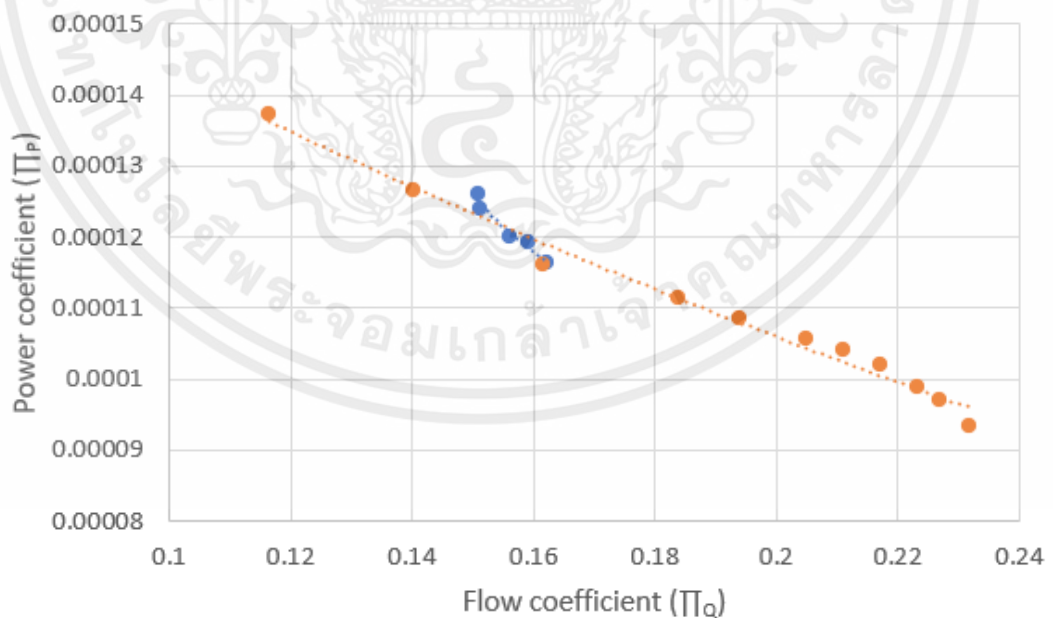
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

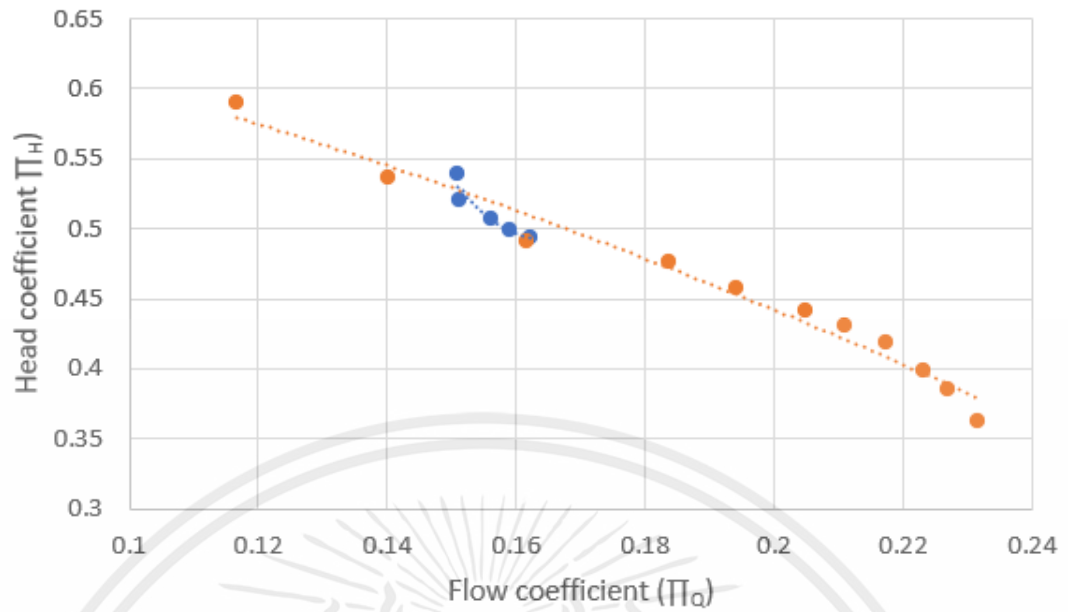
รูปที่ 6.1 กราฟสมรรถนะการทำงานของเครื่องสูบน้ำที่ความเร็วรอบ 1,450 รอบต่อนาที

(ก) $Q - H$ (ข) $Q - P_s$ (ค) $Q - \eta$

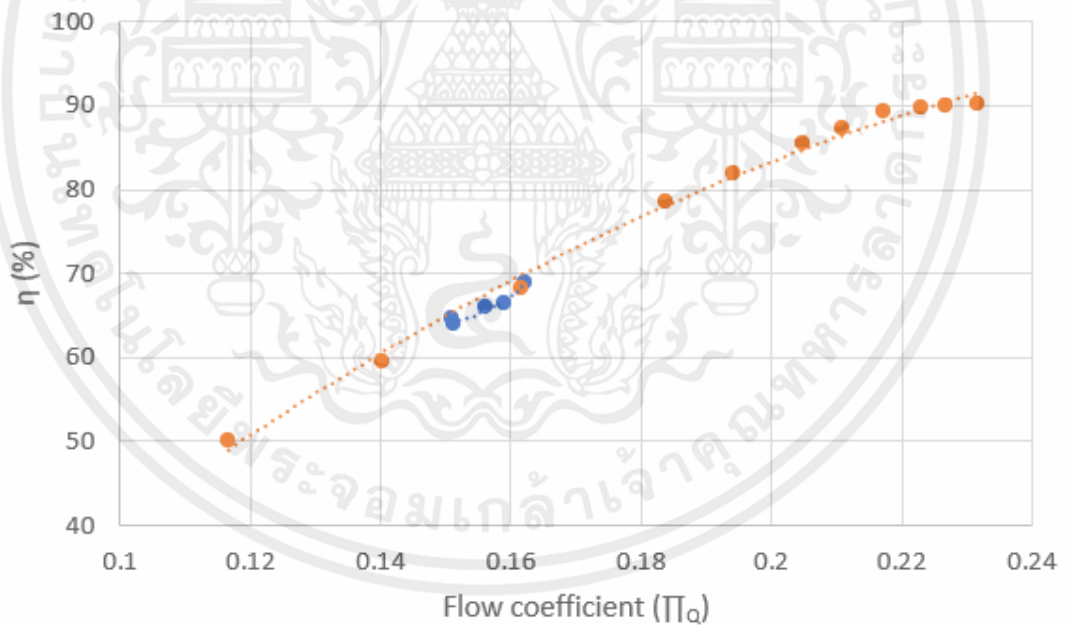


(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)



(ค)

รูปที่ 6.2 กราฟสมรรถนะการทำงานของเครื่องสูบน้ำแบบไร้มิติ (Dimensionless)

(ก) $\pi_Q - \pi_H$ (ข) $\pi_Q - \pi_P$ (ค) $\pi_Q - \eta$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการคำนวณหาความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์โดยใช้ค่าของผลการทดลองเพิ่มเติมขึ้น (คิตที่อัตราการไหลสูงสุด หรือ Full valve) ได้ค่า Uncertainty ของ Torque คือ ± 0.71402 อยู่ใน Grade 1 จากเดิมอยู่ใน Grade 2 และ Uncertainty ของ อัตราการไหล (Q) คือ ± 0.02160 อยู่ใน Grade 1 ซึ่งได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบเดิม

ตารางที่ 6.1 ค่าความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์ที่จุดทดสอบวาล์วเปิดสุดจากผลการทดสอบเพิ่มเติม

Uncertainty of Tools	จุดทดสอบ	Grade of JIS B 8301
	วาล์วเปิดสุด	
Torque (N-m)	± 0.71402	1
Pressure (bar)	± 0.00039	-
Q (m ³ /s)	± 0.02160	1

เอกสารอ้างอิง

- [1] คู่มือผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน (โรงงาน) พ.ศ.2553. การอนุรักษ์พลังงานสำหรับเครื่องสูบน้ำ
[Online], Available : [http://www2.dede.go.th/bhrd/old/Download/file_](http://www2.dede.go.th/bhrd/old/Download/file_handbook/Pre_Fac/Fac_10.pdf)
[handbook/Pre_Fac/Fac_10.pdf](http://www2.dede.go.th/bhrd/old/Download/file_handbook/Pre_Fac/Fac_10.pdf) [15 พฤศจิกายน 2564]
- [2] รศ.ดร.วิบูลย์ บุญยธโรกุล. 2529 **ปั๊มและระบบสูบน้ำ**. ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [3] White, F. M., Fluid Mechanics, 6th Ed., McGraw-Hill, New York, pp. 759-784, 2008.
- [4] จารุวัตร เจริญสุข, วันชัย อัครภูษิตกุล, กำธร เสพย์ธรรม, กิตติภาส วศินารมณ, วิวัฒน์ แสง
ทิพย์ และวิศาล ลีลาวิวัฒน์. 2563. **โครงการพัฒนาชุดทดสอบสมรรถนะ และการ
ปรับปรุงประสิทธิภาพชุดใบจักร สำหรับเครื่องสูบน้ำพญานาค**. สำนักงานพัฒนา
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัย
และนวัตกรรม.
- [5] จารุวัฒน์ มงคลธนทรศ, 2549, “อดีต ปัจจุบัน อนาคต เครื่องจักรกลการเกษตรไทย”,
สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, หน้า 7-8.
- [6] Chinsuwan, W. and Cochran, B.J. 1986. “The Axial-flow Low-lift Pump in
Thailand”. The International Rice Research Institute, Proceedings of the
International Conference on Small Farm Equipment for Developing Countries:
Past Experiences and Future.
- [7] บัญญัติ เศรษฐ์ฐิติ. “เครื่องสูบน้ำทางการเกษตร”. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สืบค้นจาก
<http://eto.ku.ac.th/neweto/e-book/other/other20.pdf>. หน้า 19-20
- [8] จีร์วัฒน์ โภคานิตย์ และ พิชัย กฤษไมตรี. 2553. “Design and Testing of a Scroll Pump”
วิศวกรรมสาร มก. ฉบับที่ 74. หน้า 5-9.
- [9] ปราโมท พลพณะนาวิ. 2554 **หลักการคำนวณปริมาณน้ำผ่านอาคารชลประทาน**. กรม
ชลประทาน ฝ่ายจัดสรรน้ำและปรับปรุงระบบชลประทาน โครงการชลประทานบุรีรัมย์.
[P.9-2]
- [10] Lesics. **Turbomachinery Fundamentals**. [Online], Available :
https://www.youtube.com/watch?v=473XQrJjDZE&t=8s&ab_channel=Lesics
[17 พฤศจิกายน 2564]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] Japanese Standards Association. 2000. “**Rotodynamic pumps – Hydraulic performance acceptance tests – Grade 1 and 2 JIS B 8301**”. Japanese Industrial Standard, Japanese Standards Association, Japan. pp. 1-37
- [12] Japanese Standards Association. 1990. “**Measurement methods of pump discharge JIS B 8302**”. Japanese Industrial Standard, Japanese Standards Association. Japan. pp. 10-23
- [13] Futek, TRS605 Non-Contact Shaft-to-Shaft Rotary Torque Sensor with Encoder [Online], Available : <https://www.futek.com/store/torque-sensors/shaft-to-shaft-rotary-torque-sensors/non-contact-shaft-to-shaft-rotary-encoder-TRS605/FSH02059>
- [14] SeekingControl, HASCON HC-200L-4 4P 30kW [Online], Available : http://seekingcontrol.com/มอเตอร์/ตัวเสื่อแบบ-เหล็กหล่อ/หน้าแปลน-เหล็ก?product_id=6155 [21 พฤศจิกายน 2564]



ภาคผนวก ก

ข้อมูลที่ใช้ในการทำแบบจำลองและผลที่ได้จากการทำแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 แสดงการกำหนดขนาดความหนาที่ตำแหน่งต่างๆ ของ NACA 0006

0.0000	0.0125	0.0250	0.0500	0.0750	0.1000	0.1500	0.2000	0.2500	0.3000	0.4000	0.5000	0.6000	0.7000	0.8000	0.9000	0.9500	1.0000
0.00000	0.00947	0.01307	0.01777	0.0210	0.02341	0.02673	0.02869	0.02971	0.03001	0.02902	0.02647	0.02282	0.01832	0.01312	0.00724	0.00403	0.00063

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 แสดงการหามุมของกระแสที่ทางออกด้วยความเร็วใน u, v, w

ครีบริยงกระแสน้ำหลักตัวต้นแบบ						ติดครีบริยงกระแสน้ำรองความหนา 5 mm					
Velocity u [m/s]	Velocity v [m/s]	Velocity w [m/s]	R [m]	V theta	degree	Velocity u [m/s]	Velocity v [m/s]	Velocity w [m/s]	R [m]	V theta	degree
0.02987	-0.04776	3.15658	0.0000	0.04776	89.13	-0.00193	0.04663	3.32879	0.000000	0.04663	89.20
0.02183	-0.13077	3.15227	0.0052	0.13077	87.62	-0.01076	-0.03624	3.34834	0.005224	0.03624	89.38
0.01379	-0.21378	3.14796	0.0104	0.21378	86.12	-0.01959	-0.11912	3.36789	0.010449	0.11912	87.97
-0.00007	-0.33686	3.16767	0.0183	0.33686	83.93	-0.03284	-0.24343	3.39721	0.018286	0.24343	85.90
-0.00650	-0.41811	3.19669	0.0235	0.41811	82.55	-0.04138	-0.32562	3.42095	0.023510	0.32562	84.56
-0.01018	-0.49892	3.23405	0.0287	0.49892	81.23	-0.04703	-0.40359	3.47162	0.028735	0.40359	83.37
-0.01742	-0.57545	3.28686	0.0340	0.57545	80.07	-0.04841	-0.48375	3.51362	0.033959	0.48375	82.16
-0.02354	-0.65015	3.34646	0.0392	0.65015	79.01	-0.04979	-0.56391	3.55562	0.039184	0.56391	80.99
-0.02966	-0.72485	3.40606	0.0444	0.72485	77.99	-0.05100	-0.63041	3.60207	0.044408	0.63041	80.07
-0.03577	-0.79955	3.46566	0.0496	0.79955	77.01	-0.05209	-0.68776	3.65149	0.049633	0.68776	79.33
-0.03883	-0.83690	3.49546	0.0522	0.83690	76.54	-0.05263	-0.71643	3.67621	0.052245	0.71643	78.97
-0.04189	-0.87425	3.52526	0.0549	0.87425	76.07	-0.05318	-0.74510	3.70092	0.054857	0.74510	78.62
-0.04495	-0.91161	3.55506	0.0575	0.91161	75.62	-0.05373	-0.77378	3.72564	0.057469	0.77378	78.27
-0.04682	-0.94883	3.58937	0.0601	0.94883	75.19	-0.05431	-0.80212	3.75303	0.060082	0.80212	77.94
-0.04464	-0.98360	3.62189	0.0627	0.98360	74.81	-0.05495	-0.83002	3.78396	0.062694	0.83002	77.63
-0.04086	-1.01683	3.64885	0.0653	1.01683	74.43	-0.05576	-0.85781	3.81470	0.065306	0.85781	77.33
-0.03709	-1.05005	3.67581	0.0679	1.05005	74.06	-0.05786	-0.88470	3.84406	0.067918	0.88470	77.04
-0.03332	-1.08328	3.70278	0.0705	1.08328	73.69	-0.05996	-0.91158	3.87342	0.070531	0.91158	76.76
-0.02955	-1.11651	3.72974	0.0731	1.11651	73.33	-0.06206	-0.93847	3.90277	0.073143	0.93847	76.48
-0.02578	-1.14974	3.75670	0.0758	1.14974	72.98	-0.06409	-0.96509	3.93159	0.075755	0.96509	76.21
-0.02399	-1.18277	3.78431	0.0784	1.18277	72.64	-0.06452	-0.98588	3.94842	0.078367	0.98588	75.98
-0.02606	-1.21544	3.81318	0.0810	1.21544	72.32	-0.06061	-0.99452	3.94587	0.080980	0.99452	75.85
-0.02813	-1.24811	3.84205	0.0836	1.24811	72.00	-0.05670	-1.00317	3.94333	0.083592	1.00317	75.73
-0.03019	-1.28078	3.87092	0.0862	1.28078	71.69	-0.05278	-1.01182	3.94079	0.086204	1.01182	75.60
-0.03226	-1.31344	3.89979	0.0888	1.31344	71.39	-0.04887	-1.02046	3.93824	0.088816	1.02046	75.47
-0.03433	-1.34611	3.92866	0.0914	1.34611	71.09	-0.04496	-1.02911	3.93570	0.091429	1.02911	75.35
-0.03640	-1.37878	3.95753	0.0940	1.37878	70.79	-0.04104	-1.03775	3.93316	0.094041	1.03775	75.22
-0.03398	-1.39924	3.97576	0.0967	1.39924	70.61	-0.03713	-1.04640	3.93061	0.096653	1.04640	75.09
-0.03157	-1.41141	3.98461	0.0993	1.41141	70.50	-0.03322	-1.05505	3.92807	0.099265	1.05505	74.97
-0.02916	-1.42357	3.99345	0.1019	1.42357	70.38	-0.02931	-1.06369	3.92552	0.101878	1.06369	74.84
-0.02675	-1.43574	4.00230	0.1045	1.43574	70.27	-0.02539	-1.07234	3.92298	0.104490	1.07234	74.71
-0.02434	-1.44790	4.01114	0.1071	1.44790	70.15	-0.02148	-1.08099	3.92044	0.107102	1.08099	74.58
-0.02193	-1.46007	4.01999	0.1097	1.46007	70.04	-0.01757	-1.08963	3.91789	0.109714	1.08963	74.46
-0.01953	-1.47224	4.02883	0.1123	1.47224	69.93	-0.01365	-1.09828	3.91535	0.112327	1.09828	74.33
-0.01712	-1.48440	4.03767	0.1149	1.48440	69.81	-0.00963	-1.10683	3.91284	0.114939	1.10683	74.21
-0.01471	-1.49657	4.04652	0.1176	1.49657	69.70	-0.00536	-1.11516	3.91042	0.117551	1.11516	74.08
-0.01230	-1.50873	4.05536	0.1202	1.50873	69.59	-0.00109	-1.12349	3.90801	0.120163	1.12349	73.96
-0.00990	-1.52079	4.06412	0.1228	1.52079	69.48	0.00319	-1.13182	3.90559	0.122776	1.13182	73.84
-0.00754	-1.53252	4.07264	0.1254	1.53252	69.38	0.00725	-1.13853	3.89412	0.125388	1.13853	73.70
-0.00517	-1.54426	4.08116	0.1280	1.54426	69.27	-0.00259	-0.21936	0.75705	0.128000	0.21936	73.84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 (ต่อ) แสดงการหามุมของกระแสที่ทางออกด้วยความเร็วใน u, v, w

ครีบริยงกระแสน้ำหลักทรงไฮโดรพอยล์						ติดครีบริยงกระแสน้ำรองเวอร์ชัน 1					
Velocity u [m/s]	Velocity v [m/s]	Velocity w [m/s]	R [m]	V theta	Degree	Velocity u [m/s]	Velocity v [m/s]	Velocity w [m/s]	R [m]	V theta	Degree
0.04336	0.01578	3.28635	0.0000	0.0158	89.72	0.03270	-0.02718	2.92361	0.0000	0.0272	89.47
0.03699	-0.08427	3.30203	0.0052	-0.0843	88.54	0.01905	-0.09603	2.93213	0.0052	0.0960	88.12
0.03061	-0.18432	3.31771	0.0104	-0.1843	86.82	0.00539	-0.16488	2.94065	0.0104	0.1649	86.79
0.02424	-0.28437	3.33339	0.0157	-0.2844	85.12	-0.00827	-0.23372	2.94918	0.0157	0.2337	85.47
0.02198	-0.38032	3.36067	0.0209	-0.3803	83.54	-0.01781	-0.29544	3.01581	0.0209	0.2954	84.40
0.02122	-0.47180	3.40547	0.0261	-0.4718	82.11	-0.02476	-0.35810	3.08454	0.0261	0.3581	83.38
0.02005	-0.56106	3.44396	0.0313	-0.5611	80.75	-0.03171	-0.42075	3.15326	0.0313	0.4207	82.40
0.01590	-0.64802	3.48595	0.0366	-0.6480	79.47	-0.03865	-0.48340	3.22199	0.0366	0.4834	81.47
0.01221	-0.73514	3.53000	0.0418	-0.7351	78.24	-0.04560	-0.54605	3.29072	0.0418	0.5460	80.58
0.00886	-0.82239	3.57558	0.0470	-0.8224	77.05	-0.05255	-0.60870	3.35944	0.0470	0.6087	79.73
0.00719	-0.86601	3.59836	0.0496	-0.8660	76.47	-0.05665	-0.63467	3.39641	0.0496	0.6347	79.42
0.00552	-0.90963	3.62115	0.0522	-0.9096	75.90	-0.06077	-0.66055	3.43343	0.0522	0.6606	79.11
0.00384	-0.95326	3.64394	0.0549	-0.9533	75.34	-0.06488	-0.68644	3.47044	0.0549	0.6864	78.81
0.00217	-0.99688	3.66672	0.0575	-0.9969	74.79	-0.06900	-0.71232	3.50745	0.0575	0.7123	78.52
0.00049	-1.04050	3.68951	0.0601	-1.0405	74.25	-0.07311	-0.73820	3.54446	0.0601	0.7382	78.24
-0.00118	-1.08413	3.71230	0.0627	-1.0841	73.72	-0.07297	-0.76062	3.58406	0.0627	0.7606	78.02
-0.00285	-1.12775	3.73508	0.0653	-1.1277	73.20	-0.07227	-0.78176	3.61880	0.0653	0.7818	77.81
-0.00453	-1.17065	3.75754	0.0679	-1.1706	72.70	-0.07243	-0.80245	3.64574	0.0679	0.8024	77.59
-0.00628	-1.20691	3.77881	0.0705	-1.2069	72.29	-0.07259	-0.82313	3.67268	0.0705	0.8231	77.37
-0.00804	-1.24257	3.79977	0.0731	-1.2426	71.89	-0.07276	-0.84381	3.69961	0.0731	0.8438	77.15
-0.00979	-1.27823	3.82073	0.0758	-1.2782	71.50	-0.07292	-0.86450	3.72655	0.0758	0.8645	76.94
-0.01154	-1.31389	3.84170	0.0784	-1.3139	71.12	-0.07308	-0.88518	3.75349	0.0784	0.8852	76.73
-0.01330	-1.34955	3.86266	0.0810	-1.3496	70.74	-0.07324	-0.90587	3.78042	0.0810	0.9059	76.52
-0.01505	-1.38521	3.88362	0.0836	-1.3852	70.37	-0.07329	-0.92653	3.80770	0.0836	0.9265	76.32
-0.01681	-1.42087	3.90459	0.0862	-1.4209	70.00	-0.07048	-0.94668	3.84289	0.0862	0.9467	76.16
-0.01738	-1.45640	3.92661	0.0888	-1.4564	69.65	-0.06768	-0.96683	3.87808	0.0888	0.9668	76.00
-0.01508	-1.49160	3.95122	0.0914	-1.4916	69.32	-0.06488	-0.98697	3.91326	0.0914	0.9870	75.84
-0.01047	-1.51946	3.96895	0.0940	-1.5195	69.05	-0.06207	-1.00712	3.94845	0.0940	1.0071	75.69
-0.00532	-1.54563	3.98509	0.0967	-1.5456	68.80	-0.05927	-1.02727	3.98364	0.0967	1.0273	75.54
-0.00017	-1.57179	4.00123	0.0993	-1.5718	68.55	-0.05676	-1.03824	4.00534	0.0993	1.0382	75.47
0.00498	-1.59795	4.01737	0.1019	-1.5980	68.31	-0.05438	-1.04511	4.02101	0.1019	1.0451	75.43
0.00580	-1.61307	4.02623	0.1045	-1.6131	68.17	-0.05200	-1.05197	4.03669	0.1045	1.0520	75.39
0.00622	-1.62716	4.03441	0.1071	-1.6272	68.03	-0.04962	-1.05884	4.05236	0.1071	1.0588	75.36
0.00664	-1.64126	4.04259	0.1097	-1.6413	67.90	-0.04724	-1.06571	4.06804	0.1097	1.0657	75.32
0.00706	-1.65535	4.05077	0.1123	-1.6554	67.77	-0.04486	-1.07258	4.08371	0.1123	1.0726	75.28
0.00748	-1.66945	4.05896	0.1149	-1.6694	67.64	-0.04248	-1.07944	4.09938	0.1149	1.0794	75.25
0.00790	-1.68355	4.06714	0.1176	-1.6835	67.51	-0.04010	-1.08631	4.11506	0.1176	1.0863	75.21
0.00916	-1.71165	4.08354	0.1228	-1.7116	67.26	-0.03534	-1.10005	4.14641	0.1228	1.1000	75.14
0.01052	-1.72554	4.09182	0.1254	-1.7255	67.13	-0.03279	-1.10747	4.16337	0.1254	1.1075	75.10
0.01174	-1.73986	4.09893	0.1280	-1.7399	67.00	-0.03020	-1.11503	4.18064	0.1280	1.1150	75.07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 (ต่อ) แสดงการหามุมของกระแสที่ทางออกด้วยความเร็วใน u, v, w

ติด crib เรียงกระแสแนวร่องเวอร์ชัน 2						ติด crib เรียงกระแสแนวร่องเวอร์ชัน 3					
Velocit u [m/s]	Velocity v [m/s]	Velocity w [m/s]	R [m]	V theta	degree	Velocity u [m/s]	Velocity v [m/s]	Velocity w [m/s]	R [m]	V theta	degree
0.04907	0.00021	2.87317	0.00000	0.0002	90.00	0.00593	0.02000	2.95795	0.00000	0.0200	89.61
0.03517	-0.05607	2.87263	0.00522	0.0561	88.88	-0.00674	-0.03375	2.97782	0.00522	0.0337	89.35
0.02128	-0.11236	2.87209	0.01045	0.1124	87.76	-0.01941	-0.08750	2.99769	0.01045	0.0875	88.33
0.00737	-0.16865	2.87222	0.01567	0.1687	86.64	-0.03208	-0.14125	3.01755	0.01567	0.1413	87.32
-0.00153	-0.21704	2.93787	0.02090	0.2170	85.77	-0.04475	-0.19500	3.03742	0.02090	0.1950	86.33
-0.00554	-0.25888	3.01086	0.02612	0.2589	85.09	-0.05741	-0.24875	3.05729	0.02612	0.2488	85.35
-0.00956	-0.30072	3.08386	0.03135	0.3007	84.43	-0.06975	-0.30280	3.08218	0.03135	0.3028	84.39
-0.01358	-0.34256	3.15685	0.03657	0.3426	83.81	-0.08330	-0.34972	3.13320	0.03657	0.3497	83.63
-0.01760	-0.38441	3.22985	0.04180	0.3844	83.21	-0.09857	-0.39117	3.18728	0.04180	0.3912	83.00
-0.02191	-0.41953	3.31212	0.04702	0.4195	82.78	-0.10371	-0.42202	3.26140	0.04702	0.4220	82.63
-0.03287	-0.44316	3.39633	0.05224	0.4432	82.57	-0.10397	-0.44780	3.34515	0.05224	0.4478	82.38
-0.03905	-0.45448	3.43757	0.05486	0.4545	82.47	-0.10410	-0.46068	3.38702	0.05486	0.4607	82.25
-0.04524	-0.46580	3.47880	0.05747	0.4658	82.37	-0.10423	-0.47357	3.42889	0.05747	0.4736	82.14
-0.05143	-0.47712	3.52003	0.06008	0.4771	82.28	-0.10436	-0.48645	3.47076	0.06008	0.4865	82.02
-0.05325	-0.48342	3.56312	0.06269	0.4834	82.27	-0.10449	-0.49934	3.51263	0.06269	0.4993	81.91
-0.05342	-0.48862	3.60102	0.06531	0.4886	82.27	-0.10462	-0.51223	3.55450	0.06531	0.5122	81.80
-0.05327	-0.49377	3.63668	0.06792	0.4938	82.27	-0.10497	-0.52518	3.59874	0.06792	0.5252	81.70
-0.05312	-0.49892	3.67235	0.07053	0.4989	82.26	-0.10585	-0.53828	3.64855	0.07053	0.5383	81.61
-0.05297	-0.50407	3.70801	0.07314	0.5041	82.26	-0.10606	-0.55118	3.69832	0.07314	0.5512	81.52
-0.05281	-0.50922	3.74367	0.07576	0.5092	82.25	-0.10286	-0.56243	3.74676	0.07576	0.5624	81.46
-0.05266	-0.51438	3.77934	0.07837	0.5144	82.25	-0.09661	-0.56755	3.78378	0.07837	0.5676	81.47
-0.05251	-0.51953	3.81500	0.08098	0.5195	82.25	-0.09352	-0.57023	3.80724	0.08098	0.5702	81.48
-0.05163	-0.52438	3.85294	0.08359	0.5244	82.25	-0.09069	-0.57279	3.83031	0.08359	0.5728	81.49
-0.04897	-0.52852	3.89640	0.08620	0.5285	82.28	-0.08747	-0.57542	3.85437	0.08620	0.5754	81.51
-0.04631	-0.53265	3.93987	0.08882	0.5326	82.30	-0.08446	-0.57800	3.87795	0.08882	0.5780	81.52
-0.04365	-0.53678	3.98334	0.09143	0.5368	82.33	-0.08144	-0.58058	3.90154	0.09143	0.5806	81.54
-0.04099	-0.54091	4.02681	0.09404	0.5409	82.35	-0.07843	-0.58316	3.92512	0.09404	0.5832	81.55
-0.03833	-0.54505	4.07027	0.09665	0.5450	82.37	-0.07542	-0.58574	3.94871	0.09665	0.5857	81.56
-0.03589	-0.54710	4.09441	0.09927	0.5471	82.39	-0.07241	-0.58832	3.97229	0.09927	0.5883	81.58
-0.03352	-0.54852	4.11270	0.10188	0.5485	82.40	-0.06940	-0.59090	3.99587	0.10188	0.5909	81.59
-0.03115	-0.54995	4.13100	0.10449	0.5499	82.42	-0.06638	-0.59348	4.01946	0.10449	0.5935	81.60
-0.02878	-0.55137	4.14929	0.10710	0.5514	82.43	-0.06337	-0.59606	4.04304	0.10710	0.5961	81.61
-0.02641	-0.55279	4.16758	0.10971	0.5528	82.44	-0.06036	-0.59864	4.06663	0.10971	0.5986	81.63
-0.02404	-0.55422	4.18588	0.11233	0.5542	82.46	-0.05735	-0.60122	4.09021	0.11233	0.6012	81.64
-0.02167	-0.55564	4.20417	0.11494	0.5556	82.47	-0.05433	-0.60380	4.11379	0.11494	0.6038	81.65
-0.01930	-0.55707	4.22247	0.11755	0.5571	82.48	-0.05132	-0.60638	4.13738	0.11755	0.6064	81.66
-0.01693	-0.55849	4.24076	0.12016	0.5585	82.50	-0.04831	-0.60895	4.16096	0.12016	0.6090	81.67
-0.01456	-0.55992	4.25905	0.12278	0.5599	82.51	-0.04530	-0.61153	4.18455	0.12278	0.6115	81.69
-0.01228	-0.56127	4.27852	0.12539	0.5613	82.53	-0.04228	-0.61411	4.20813	0.12539	0.6141	81.70
-0.01006	-0.56258	4.29887	0.12800	0.5626	82.54	-0.03944	-0.61621	4.22473	0.12800	0.6162	81.70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 (ต่อ) แสดงการหามุมของกระแสที่ทางออกด้วยความเร็วใน u, v, w

ติด crib เรียง กระแส น้ำ ร่อง เวอร์ชัน 4						ติด crib เรียง กระแส น้ำ ร่อง เวอร์ชัน 1 ตำแหน่ง A					
Velocity u [m/s]	Velocity v [m/s]	Velocity w [m/s]	R [m]	V theta	degree	Velocity u [m/s]	Velocity v [m/s]	Velocity w [m/s]	R [m]	V theta	degree
0.04243	0.01895	2.88221	0.0000	0.01895	89.62	0.02756	-0.00589	2.97218	0.0000	0.0059	89.89
0.02861	-0.03828	2.88949	0.0052	0.03828	89.24	0.01799	-0.07549	2.97784	0.0052	0.0755	88.55
0.01480	-0.09551	2.89677	0.0104	0.09551	88.11	0.00841	-0.14509	2.98351	0.0104	0.1451	87.22
0.00098	-0.15274	2.90404	0.0157	0.15274	86.99	-0.00345	-0.21095	3.01330	0.0157	0.2109	86.00
-0.00583	-0.20601	2.97890	0.0209	0.20601	86.04	-0.01749	-0.27327	3.06592	0.0209	0.2733	84.91
-0.00936	-0.25619	3.05301	0.0261	0.25619	85.20	-0.03153	-0.33558	3.11854	0.0261	0.3356	83.86
-0.01290	-0.30637	3.12713	0.0313	0.30637	84.40	-0.04309	-0.39701	3.18524	0.0313	0.3970	82.90
-0.01643	-0.35655	3.20124	0.0366	0.35655	83.64	-0.04795	-0.45431	3.25189	0.0366	0.4543	82.05
-0.01996	-0.40672	3.27536	0.0418	0.40672	82.92	-0.05280	-0.51162	3.31855	0.0418	0.5116	81.24
-0.02378	-0.45318	3.35177	0.0470	0.45318	82.30	-0.05766	-0.56892	3.38520	0.0470	0.5689	80.46
-0.02713	-0.47037	3.39259	0.0496	0.47037	82.11	-0.06008	-0.59758	3.41853	0.0496	0.5976	80.08
-0.03162	-0.48774	3.43193	0.0522	0.48774	81.91	-0.06251	-0.62623	3.45185	0.0522	0.6262	79.72
-0.03611	-0.50512	3.47127	0.0549	0.50512	81.72	-0.06494	-0.65488	3.48518	0.0549	0.6549	79.36
-0.04060	-0.52249	3.51061	0.0575	0.52249	81.53	-0.06736	-0.68353	3.51851	0.0575	0.6835	79.01
-0.04509	-0.53987	3.54995	0.0601	0.53987	81.35	-0.06979	-0.71218	3.55183	0.0601	0.7122	78.66
-0.04816	-0.55464	3.58835	0.0627	0.55464	81.21	-0.07171	-0.74135	3.58547	0.0627	0.7414	78.32
-0.04805	-0.56357	3.62463	0.0653	0.56357	81.16	-0.07343	-0.77072	3.61923	0.0653	0.7707	77.98
-0.04794	-0.57251	3.66091	0.0679	0.57251	81.11	-0.07471	-0.79954	3.65601	0.0679	0.7995	77.66
-0.04783	-0.58144	3.69719	0.0705	0.58144	81.06	-0.07516	-0.82730	3.69856	0.0705	0.8273	77.39
-0.04772	-0.59038	3.73347	0.0731	0.59038	81.01	-0.07560	-0.85507	3.74111	0.0731	0.8551	77.13
-0.04761	-0.59931	3.76975	0.0758	0.59931	80.97	-0.07310	-0.87886	3.77190	0.0758	0.8789	76.88
-0.04750	-0.60825	3.80603	0.0784	0.60825	80.92	-0.06914	-0.90030	3.79814	0.0784	0.9003	76.66
-0.04651	-0.61682	3.84606	0.0810	0.61682	80.89	-0.06539	-0.91917	3.83465	0.0810	0.9192	76.52
-0.04484	-0.62511	3.88892	0.0836	0.62511	80.87	-0.06264	-0.93152	3.85765	0.0836	0.9315	76.42
-0.04179	-0.63391	3.93222	0.0862	0.63391	80.84	-0.06021	-0.94183	3.87643	0.0862	0.9418	76.34
-0.03853	-0.64279	3.97559	0.0888	0.64279	80.82	-0.05777	-0.95215	3.89520	0.0888	0.9521	76.26
-0.03527	-0.65166	4.01896	0.0914	0.65166	80.79	-0.05533	-0.96246	3.91398	0.0914	0.9625	76.18
-0.03201	-0.66054	4.06233	0.0940	0.66054	80.76	-0.05290	-0.97277	3.93276	0.0940	0.9728	76.11
-0.02874	-0.66941	4.10570	0.0967	0.66941	80.74	-0.05046	-0.98308	3.95153	0.0967	0.9831	76.03
-0.02584	-0.67348	4.13127	0.0993	0.67348	80.74	-0.04802	-0.99340	3.97031	0.0993	0.9934	75.95
-0.02378	-0.67562	4.14677	0.1019	0.67562	80.75	-0.04559	-1.00371	3.98909	0.1019	1.0037	75.88
-0.02172	-0.67775	4.16228	0.1045	0.67775	80.75	-0.04315	-1.01402	4.00786	0.1045	1.0140	75.80
-0.01966	-0.67989	4.17779	0.1071	0.67989	80.76	-0.04072	-1.02433	4.02664	0.1071	1.0243	75.73
-0.01761	-0.68203	4.19330	0.1097	0.68203	80.76	-0.03828	-1.03464	4.04542	0.1097	1.0346	75.65
-0.01555	-0.68416	4.20881	0.1123	0.68416	80.77	-0.03584	-1.04496	4.06419	0.1123	1.0450	75.58
-0.01349	-0.68630	4.22432	0.1149	0.68630	80.77	-0.03341	-1.05527	4.08297	0.1149	1.0553	75.51
-0.01143	-0.68843	4.23983	0.1176	0.68843	80.78	-0.03097	-1.06558	4.10175	0.1176	1.0656	75.44
-0.00937	-0.69057	4.25534	0.1202	0.69057	80.78	-0.02853	-1.07589	4.12053	0.1202	1.0759	75.37
-0.00731	-0.69271	4.27085	0.1228	0.69271	80.79	-0.02610	-1.08620	4.13930	0.1228	1.0862	75.30
-0.00525	-0.69484	4.28636	0.1254	0.69484	80.79	-0.02362	-1.09669	4.15904	0.1254	1.0967	75.23
-0.00319	-0.69698	4.30187	0.1280	0.69698	80.80	-0.01979	-1.10392	4.17367	0.1280	1.1039	75.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 (ต่อ) แสดงการหามุมของกระแสที่ทางออกด้วยความเร็วใน u, v, w

ติดตั้งเครื่องกระแสน้ำรอกเวอร์ชัน 1 ตำแหน่ง B						ติดตั้งเครื่องกระแสน้ำรอกเวอร์ชัน 1 ตำแหน่ง c					
Velocity u [m/s]	Velocity v [m/s]	Velocity w [m/s]	R [m]	V theta	degree	Velocity u [m/s]	Velocity v [m/s]	Velocity w [m/s]	R [m]	V theta	degree
-0.05251	0.01863	3.05376	0.00	0.01863	89.65	-0.01266	-0.01260	3.04296	0.00	0.01260	89.76
-0.06427	-0.04862	3.07198	0.01	0.04862	89.09	-0.02627	-0.07921	3.06426	0.01	0.07921	88.52
-0.07579	-0.11563	3.08821	0.01	0.11563	87.86	-0.03989	-0.14582	3.08556	0.01	0.14582	87.29
-0.08731	-0.18265	3.10443	0.02	0.18265	86.63	-0.05351	-0.21243	3.10686	0.02	0.21243	86.09
-0.09882	-0.24967	3.12066	0.02	0.24967	85.43	-0.06712	-0.27904	3.12816	0.02	0.27904	84.90
-0.11034	-0.31668	3.13688	0.03	0.31668	84.24	-0.08074	-0.34565	3.14946	0.03	0.34565	83.74
-0.12186	-0.38370	3.15311	0.03	0.38370	83.06	-0.09494	-0.41206	3.17409	0.03	0.41206	82.60
-0.13227	-0.44573	3.18455	0.04	0.44573	82.03	-0.10934	-0.47237	3.21901	0.04	0.47237	81.65
-0.13724	-0.47565	3.20362	0.04	0.47565	81.55	-0.11608	-0.50122	3.24348	0.04	0.50122	81.22
-0.14220	-0.50556	3.22269	0.04	0.50556	81.08	-0.12283	-0.53007	3.26795	0.04	0.53007	80.79
-0.14535	-0.53498	3.25704	0.04	0.53498	80.67	-0.12662	-0.55710	3.29570	0.04	0.55710	80.41
-0.14339	-0.67311	3.43880	0.06	0.67311	78.93	-0.13083	-0.68320	3.45078	0.06	0.68320	78.80
-0.14288	-0.70065	3.47464	0.06	0.70065	78.60	-0.13168	-0.70842	3.48180	0.06	0.70842	78.50
-0.14237	-0.72820	3.51048	0.06	0.72820	78.28	-0.13252	-0.73364	3.51281	0.06	0.73364	78.20
-0.14186	-0.75574	3.54632	0.07	0.75574	77.97	-0.13336	-0.75886	3.54383	0.07	0.75886	77.91
-0.14134	-0.78329	3.58215	0.07	0.78329	77.67	-0.13401	-0.78412	3.57904	0.07	0.78412	77.64
-0.14083	-0.81083	3.61799	0.07	0.81083	77.37	-0.13444	-0.80942	3.61874	0.07	0.80942	77.39
-0.13829	-0.83748	3.65748	0.07	0.83748	77.10	-0.13487	-0.83471	3.65844	0.07	0.83471	77.15
-0.13418	-0.86255	3.69852	0.08	0.86255	76.87	-0.13134	-0.85731	3.69697	0.08	0.85731	76.94
-0.12906	-0.88014	3.73120	0.08	0.88014	76.73	-0.12514	-0.87474	3.72956	0.08	0.87474	76.80
-0.12514	-0.89045	3.75025	0.08	0.89045	76.64	-0.12170	-0.88529	3.74854	0.08	0.88529	76.71
-0.12122	-0.90076	3.76929	0.08	0.90076	76.56	-0.11825	-0.89585	3.76753	0.08	0.89585	76.62
-0.11730	-0.91107	3.78834	0.09	0.91107	76.48	-0.11481	-0.90640	3.78652	0.09	0.90640	76.54
-0.11338	-0.92137	3.80739	0.09	0.92137	76.40	-0.11137	-0.91696	3.80550	0.09	0.91696	76.45
-0.10946	-0.93168	3.82643	0.09	0.93168	76.32	-0.10792	-0.92752	3.82449	0.09	0.92752	76.37
-0.10553	-0.94199	3.84548	0.09	0.94199	76.24	-0.10448	-0.93807	3.84347	0.09	0.93807	76.28
-0.10161	-0.95230	3.86452	0.10	0.95230	76.16	-0.10103	-0.94863	3.86246	0.10	0.94863	76.20
-0.09769	-0.96261	3.88357	0.10	0.96261	76.08	-0.09759	-0.95918	3.88145	0.10	0.95918	76.12
-0.09377	-0.97291	3.90261	0.10	0.97291	76.00	-0.09415	-0.96974	3.90043	0.10	0.96974	76.04
-0.08985	-0.98322	3.92166	0.10	0.98322	75.93	-0.09070	-0.98029	3.91942	0.10	0.98029	75.96
-0.08593	-0.99353	3.94070	0.11	0.99353	75.85	-0.08726	-0.99085	3.93841	0.11	0.99085	75.88
-0.08201	-1.00384	3.95975	0.11	1.00384	75.77	-0.08381	-1.00140	3.95739	0.11	1.00140	75.80
-0.07808	-1.01415	3.97879	0.11	1.01415	75.70	-0.08037	-1.01196	3.97638	0.11	1.01196	75.72
-0.07416	-1.02445	3.99784	0.11	1.02445	75.63	-0.07692	-1.02251	3.99536	0.11	1.02251	75.64
-0.07024	-1.03476	4.01688	0.12	1.03476	75.55	-0.07348	-1.03307	4.01435	0.12	1.03307	75.57
-0.06685	-1.04484	4.03575	0.12	1.04484	75.49	-0.07004	-1.04362	4.03334	0.12	1.04362	75.49
-0.06207	-1.05537	4.05616	0.12	1.05537	75.42	-0.06659	-1.05418	4.05232	0.12	1.05418	75.42
-0.05808	-1.06549	4.07546	0.13	1.06549	75.35	-0.06322	-1.06448	4.07000	0.13	1.06448	75.34
-0.05370	-1.07227	4.09075	0.13	1.07227	75.31	-0.06062	-1.07332	4.08379	0.13	1.07332	75.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

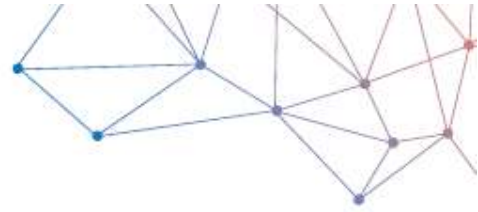
ตารางที่ ก.2 (ต่อ) แสดงการหามุมของกระแสที่ทางออกด้วยความเร็วใน u, v, w

ติด crib เรียงกระแสแนวร่องเวอร์ชัน 1 ตำแหน่ง D						ติด crib เรียงกระแสแนวร่องเวอร์ชัน 1 ตำแหน่ง E					
Velocity u [m s ⁻¹]	Velocity v [m s ⁻¹]	Velocity w [m s ⁻¹]	R [m]	V theta	degree	Velocity u [m s ⁻¹]	Velocity v [m s ⁻¹]	Velocity w [m s ⁻¹]	R [m]	V theta	degree
0.01795	-0.04735	3.02818	0.0000	0.04735	89.10	0.00346	-0.05891	3.00601	0.0000	0.05891	88.88
0.00835	-0.11114	3.04744	0.0052	0.11114	87.91	-0.00781	-0.12408	3.00373	0.0052	0.12408	87.63
-0.00126	-0.17493	3.06670	0.0104	0.17493	86.74	-0.01909	-0.18926	3.00145	0.0104	0.18926	86.39
-0.01086	-0.23872	3.08597	0.0157	0.23872	85.58	-0.03210	-0.25233	3.01726	0.0157	0.25233	85.22
-0.02046	-0.30251	3.10523	0.0209	0.30251	84.44	-0.04817	-0.31173	3.06472	0.0209	0.31173	84.19
-0.03007	-0.36630	3.12449	0.0261	0.36630	83.31	-0.06423	-0.37112	3.11217	0.0261	0.37112	83.20
-0.03988	-0.42914	3.15070	0.0313	0.42914	82.24	-0.07720	-0.42943	3.16490	0.0313	0.42943	82.27
-0.05098	-0.48677	3.20385	0.0366	0.48677	81.36	-0.08256	-0.48250	3.22475	0.0366	0.48250	81.49
-0.06264	-0.54260	3.25215	0.0418	0.54260	80.53	-0.08791	-0.53558	3.28460	0.0418	0.53558	80.74
-0.07091	-0.59757	3.31197	0.0470	0.59757	79.77	-0.09326	-0.58866	3.34444	0.0470	0.58866	80.02
-0.07285	-0.62450	3.34930	0.0496	0.62450	79.44	-0.09594	-0.61520	3.37437	0.0496	0.61520	79.67
-0.07480	-0.65143	3.38662	0.0522	0.65143	79.11	-0.09861	-0.64174	3.40429	0.0522	0.64174	79.32
-0.07675	-0.67837	3.42395	0.0549	0.67837	78.79	-0.10129	-0.66828	3.43422	0.0549	0.66828	78.99
-0.07870	-0.70530	3.46127	0.0575	0.70530	78.48	-0.10396	-0.69482	3.46414	0.0575	0.69482	78.66
-0.08065	-0.73223	3.49859	0.0601	0.73223	78.18	-0.10664	-0.72135	3.49406	0.0601	0.72135	78.34
-0.08260	-0.75917	3.53592	0.0627	0.75917	77.88	-0.10932	-0.74789	3.52399	0.0627	0.74789	78.02
-0.08455	-0.78610	3.57324	0.0653	0.78610	77.59	-0.11033	-0.77382	3.55925	0.0653	0.77382	77.73
-0.08650	-0.81303	3.61057	0.0679	0.81303	77.31	-0.11033	-0.79937	3.59777	0.0679	0.79937	77.47
-0.08786	-0.83969	3.65244	0.0705	0.83969	77.05	-0.11078	-0.82531	3.63737	0.0705	0.82531	77.22
-0.08903	-0.86626	3.69580	0.0731	0.86626	76.81	-0.11179	-0.85175	3.67827	0.0731	0.85175	76.96
-0.08783	-0.89006	3.73664	0.0758	0.89006	76.60	-0.11203	-0.87753	3.71646	0.0758	0.87753	76.71
-0.08518	-0.90795	3.76951	0.0784	0.90795	76.46	-0.10775	-0.89943	3.73846	0.0784	0.89943	76.47
-0.08417	-0.91793	3.79025	0.0810	0.91793	76.39	-0.10345	-0.91836	3.76557	0.0810	0.91836	76.29
-0.08315	-0.92790	3.81100	0.0836	0.92790	76.32	-0.10128	-0.93029	3.78512	0.0836	0.93029	76.19
-0.08214	-0.93788	3.83174	0.0862	0.93788	76.25	-0.09985	-0.94000	3.80161	0.0862	0.94000	76.11
-0.08135	-0.94770	3.85235	0.0888	0.94770	76.18	-0.09843	-0.94971	3.81811	0.0888	0.94971	76.03
-0.08005	-0.95777	3.87364	0.0914	0.95777	76.11	-0.09700	-0.95941	3.83460	0.0914	0.95941	75.95
-0.07899	-0.96771	3.89465	0.0940	0.96771	76.05	-0.09558	-0.96912	3.85110	0.0940	0.96912	75.87
-0.07794	-0.97764	3.91566	0.0967	0.97764	75.98	-0.09416	-0.97882	3.86759	0.0967	0.97882	75.80
-0.07688	-0.98758	3.93667	0.0993	0.98758	75.92	-0.09273	-0.98853	3.88408	0.0993	0.98853	75.72
-0.07583	-0.99752	3.95768	0.1019	0.99752	75.85	-0.09131	-0.99824	3.90058	0.1019	0.99824	75.64
-0.07477	-1.00745	3.97870	0.1045	1.00745	75.79	-0.08988	-1.00794	3.91707	0.1045	1.00794	75.57
-0.07372	-1.01739	3.99971	0.1071	1.01739	75.73	-0.08846	-1.01765	3.93357	0.1071	1.01765	75.50
-0.07267	-1.02733	4.02072	0.1097	1.02733	75.67	-0.08704	-1.02736	3.95006	0.1097	1.02736	75.42
-0.07161	-1.03726	4.04173	0.1123	1.03726	75.61	-0.08561	-1.03706	3.96656	0.1123	1.03706	75.35
-0.07056	-1.04720	4.06274	0.1149	1.04720	75.55	-0.08419	-1.04677	3.98305	0.1149	1.04677	75.28
-0.06950	-1.05713	4.08376	0.1176	1.05713	75.49	-0.08276	-1.05647	3.99955	0.1176	1.05647	75.20
-0.06845	-1.06707	4.10477	0.1202	1.06707	75.43	-0.08134	-1.06618	4.01604	0.1202	1.06618	75.13
-0.06739	-1.07701	4.12578	0.1228	1.07701	75.37	-0.07991	-1.07589	4.03253	0.1228	1.07589	75.06
-0.06634	-1.08694	4.14679	0.1254	1.08694	75.31	-0.07844	-1.08488	4.04797	0.1254	1.08488	75.00
-0.06558	-1.09413	4.16269	0.1280	1.09413	75.27	-0.07685	-1.09164	4.06216	0.1280	1.09164	74.96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DATA SHEET

CT 110

Tachometer



Technical specifications

Parameters	Measuring units	Accuracy*	Measuring range	Resolution
Optical tachometer	rpm	From 60 to 10 000 rpm: ±0.3% of reading ±1 rpm From 10 001 to 60 000 rpm: ±30 tr/min	From 60 to 60 000 rpm	1 rpm
Contact tachometer	rpm, m/min, ft/min, in/min, m/s	From 30 to 3000 rpm: ±1% of reading ±1 rpm	From 30 to 3000 rpm	1 rpm

รูปที่ ข.1 แสดงผลการสอบเทียบของ Tachometer

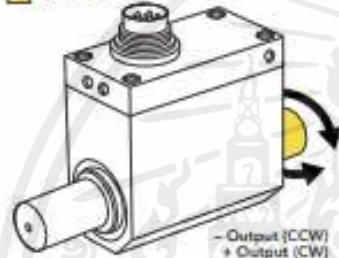
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



FEATURES

- Utilizes strain gauge technology
- Angle speed feedback
- Compact size
- Can operate up to 7000 RPM

Active end



SPECIFICATIONS

PERFORMANCE

Nonlinearity	±0.2% of RO
Hysteresis	±0.1% of RO
Nonrepeatability	±0.2% of RO
Rotational Speed	7000 Max

ELECTRICAL

Rated Output (RO)	±5 VDC
Excitation	11–26 VDC, 1 Watt
Connector	12 pin Binder Series #581 (09-0331-90-12)

MECHANICAL

Self Overload	150% of RO
Zero Balance	±1% of RO
Material	Aluminum (Housing), Steel Alloy (Shaft)
IP Rating	IP40

TEMPERATURE

Operating Temperature	-13 to 176°F (-25 to 80°C)
Compensated Temperature	41 to 122°F (5 to 50°C)
Temperature Shift Zero	±0.01% of RO/°F (±0.02% of RO/°C)
Temperature Shift Span	±0.01% of RO/°F (±0.02% of RO/°C)

CALIBRATION

Calibration Test Excitation	12 VDC
Calibration (standard)	Certificate of Conformance
Calibration (available)	5-pt CW & CCW
Shunt Calibration Value	With sensor fully connected apply 11–26 VDC to Pins A & K to generate 5 VDC nom output

ENCODER

Output	Impulse (TTL)
Pulses per Revolution	2 × 360
Excitation	5 VDC
Angle 1	Leading Pulse
Angle 2	Trailing Pulse (90°)

CONFORMITY

RoHS	2014/30/EU
CE	Declaration of Conformity

Sensor Solution Source
Load • Torque • Pressure • Multi-Axis Calibration • Strain • Weighing • Software
www.futek.com



ROHS



รูปที่ ข.2 แสดงผลการสอบเทียบของ Torque sensor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SIEMENS

Industry Sector

Quality inspection certificate / Certificat d'inspection qualité

N° de série / Serial number

45880241298

VERIFICATION AU MONTAGE / Assembly check	Resultat
Vérifier le collage du rebord du liner / Check the sticking of the edge of the liner Vérifier l'absence de patch sur les électrodes / Check	OK
Vérifier l'aspect intérieur du liner + montage des électrodes + absence de patch de protection des électrodes ==> Voir catalogue d'erreurs FCC / Check the internal appearance of the liner, assembly of electrodes and lack of electrodes patches	OK
Vérifier l'aspect extérieur de la peinture (peinture écaillée, rayures, peau d'orange, excès de peinture, impuretés, problèmes d'apparences, nuances de couleur) ==> Voir catalogue d'erreurs FCC / Check the external appearance of the painting	OK
MAG8000 Afficheur LCD. Vérifier l'aspect (propreté, absence de chocs -coins-, film de protection enlevé) / MAG8000 LCD display. Check of cosmetic errors (cleanliness, no damage, protective film removed)	NA
Vérifier la présence de l'étiquette verte + étoile et contrôler si collées distinctement / Verify the presence and the good sticking of the green label + Star label	OK
Si potting demandé (cockpit) vérifier s'il est réalisé (MAG8000, option Y41, spéciaux) / If MAG8000 check if potting is needed (cockpit) and if it's realized (MAG8000, Y41 option, specials)	NA

La signature certifie la conformité des opérations ci-dessus
The signature certify the conformity of the above operations

Nom et visa de l'opérateur / Name and visa controller

Date

VANNIER Isabelle

10 JUL. 2018

VERIFICATION A L'EMBALLAGE / Packaging verification	Resultat
Si MAG8000 Remote avec potting dans l'électronique - Vérifier concordance des N° de série sur les étiquettes de l'électronique, du couvercle et du sensor / Compare the serial numbers on the labels between PCBA, the lid and the sensor	NA
Si MAG8000 GSM : Vérifier la présence du macaron de test bleu collé sur le module / Check the presence of the blue test patch stuck on the module	NA
Vérification de l'état de l'emballage (aspect du carton, présence mousse de protection) ==> Voir catalogue d'erreurs FCC / Verify the condition of the packaging (appearance of the box, foam presence)	OK
Si batterie au lithium : Contrôler la présence de l'étiquette "produit dangereux" sur carton / If lithium-ion battery : check the presence of the label "Dangerous product" on the box	NA
DIVERS - AUTRES OPTIONS	
Certificat de calibration / Product labels / Etiquette emballage / OF : vérifier la concordance du n° de série système et de la désignation entre les différents supports / Calibration certificate - Compare the serial number of the system and designation with the OF	OK
Sensorprom : vérifier la présence / Check if available	OK
Product label - vérifier le Calfactor par rapport au certificat de calibration / Check the Calfactor with the calibration certificate	OK

La signature certifie la conformité des opérations ci-dessus
The signature certify the conformity of the above operations

Nom et visa de l'opérateur / Name and visa controller

Date

WALTHER Hervé

10 JUL. 2018

SIEMENS SAS

Division Production Sensors and Communication

Etablissement de Haguenau

1, Chemin de la Sandlach

CS60188

F - 67506 Haguenau Cedex

Tél (+33) 03.89.06.55.55

Fax (+33) 03.89.06.66.66

Copyrights - 2013 L. Siemens SAS - Etablissement de Haguenau *

ASE43091533A_003

รูปที่ ข.3 แสดงผลการสอบเทียบของ Electromagnetic flow meter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SIEMENS**Industry Sector**

**Factory Calibration Certificate / Werkskalibrierungszertifikat /
Certificat d'étalonnage usine**

Topic / Thema / Sujet: SITRANS F Flowmeter / Durchflussmessgerät / Débitmètre

Object / Betreff / Objet:

Siemens order / Siemensauftrag / Commande Siemens	:	0001658383/000090
Flowmeter type / Durchflussmessgerättyp / Type de débitmètre	:	Sitrans FM MAG5100 W
Nominal sensor diameter / Messaufnehmer-Nennweite / Diamètre nominal de capteur	:	DN 200 (8")
Product order No. / Produktbestellnummer / N° de référence d'appareil	:	7ME65204PB122AA1-Z
Options ordered / Bestellten Optionen / Options commandées	:	N02
System serial No. / System Seriennummer / N° de série du système	:	458802H278

Technical data / Technische Daten / Données techniques:

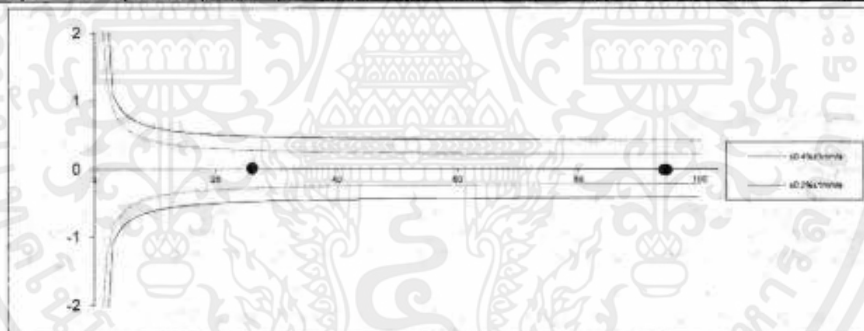
Calibration factor / Kalibrierungsfaktor / Facteur d'étalonnage	:	24.03957158
Calibration medium / Kalibriermedium / Moyen de calibration	:	Water / Wasser / Eau
Calibrated full scale flow / Kalibrierter Messbereichsendwert / Fin de plage de mesure étalonnée	:	550 m ³ /h / 2421.581 US gpm
Calibration rig / Kalibrierstand / Plate-forme d'étalonnage	:	Banc HNU 3

Standards / Normen / Normes:

Reference meter method (reference meter calibrated according to ISO 4185-1980) /
Referenzmessgerätmethode (Referenzgerät kalibriert laut ISO 4185-1980) / Méthode
avec compteur de référence (étalonné suivant ISO 4185-1990)

Results / Ergebnisse / Résultats:

Point # Messpunkt nr Point mesure n°	Flowrate Durchfluss Débit [%]	Fluid temperature Flüssigkeitemperatur Température du fluide		Reference flow value Referenz Durchflusswert Débit de référence		Flowmeter output / Durchflussmessgerätsausgang / Sortie de débitmètre		Error Fehler / Erreur [%]
		[°C]	[°F]	[m ³ /h]	[US gpm]	Flowrate Durchflussmenge / Débit [m ³ /h]	[US gpm]	
1	94	16.2	61.2	517.19	2277.14	517.15	2276.92	-0.01
2	95	16.3	61.3	520.07	2289.81	520.02	2289.59	-0.01
3	26	16.3	61.3	143.32	631.02	143.35	631.14	0.02
4	26	16.3	61.3	143.09	629.99	143.11	630.08	0.01



Summary of the results / Zusammenfassung der Ergebnisse: / Sommaire des résultats obtenus :

- The measured values are within the specified limits / Die gemessenen Werte liegen innerhalb der Toleranzen / Les résultats de mesure se trouvent dans les tolérances définies

Siemens SAS Etablissement de Haguenau	Issued by / Erstellt von / émis par Grosse J	Date / Datum / Date 2018/07/10
--	--	--

Page 1

รูปที่ ข.3 (ต่อ) แสดงผลการสอบเทียบของ Electromagnetic flow meter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SIEMENS**Industry Sector**

**Factory Calibration Certificate / Werkskalibrierungszertifikat /
Certificat d'étalonnage usine**

Test rig characteristics Prüfstand Merkmale / Caractéristiques de la plate-forme de test																	
	<table border="1"> <tr> <td>Test rig ID / Prüfstand ID / ID de la plate-forme de test</td> <td>Banc HNU 3</td> </tr> <tr> <td>Fluid / Flüssigkeit / Fluide</td> <td>Water / Wasser / Eau</td> </tr> <tr> <td>Fluid temperature / Flüssigkeit Temp. / Temp. du fluide</td> <td>10-30 °C / 50-86 °F</td> </tr> <tr> <td>Test rig capacity / Prüfstand Kapazität / Capacité de la plate-forme</td> <td>DN 200...600 / 8" ...24"</td> </tr> <tr> <td>Max. Flowrate / Max. Durchfluss / Débit max.</td> <td>2500 m³/h / 11007 US gpm</td> </tr> <tr> <td>Min. Flowrate / Min. Durchfluss. / Débit min</td> <td>1 m³/h / 4.4 US gpm</td> </tr> <tr> <td>Max. Mass / Max. Masse / Masse max.</td> <td>20000 kg / 44092 lb</td> </tr> <tr> <td>Uncertainty / Ungenauigkeit / Incertitude</td> <td>Max. 0,15 %</td> </tr> </table>	Test rig ID / Prüfstand ID / ID de la plate-forme de test	Banc HNU 3	Fluid / Flüssigkeit / Fluide	Water / Wasser / Eau	Fluid temperature / Flüssigkeit Temp. / Temp. du fluide	10-30 °C / 50-86 °F	Test rig capacity / Prüfstand Kapazität / Capacité de la plate-forme	DN 200...600 / 8" ...24"	Max. Flowrate / Max. Durchfluss / Débit max.	2500 m³/h / 11007 US gpm	Min. Flowrate / Min. Durchfluss. / Débit min	1 m³/h / 4.4 US gpm	Max. Mass / Max. Masse / Masse max.	20000 kg / 44092 lb	Uncertainty / Ungenauigkeit / Incertitude	Max. 0,15 %
Test rig ID / Prüfstand ID / ID de la plate-forme de test	Banc HNU 3																
Fluid / Flüssigkeit / Fluide	Water / Wasser / Eau																
Fluid temperature / Flüssigkeit Temp. / Temp. du fluide	10-30 °C / 50-86 °F																
Test rig capacity / Prüfstand Kapazität / Capacité de la plate-forme	DN 200...600 / 8" ...24"																
Max. Flowrate / Max. Durchfluss / Débit max.	2500 m³/h / 11007 US gpm																
Min. Flowrate / Min. Durchfluss. / Débit min	1 m³/h / 4.4 US gpm																
Max. Mass / Max. Masse / Masse max.	20000 kg / 44092 lb																
Uncertainty / Ungenauigkeit / Incertitude	Max. 0,15 %																
<p>1) Reservoir / Tank / Réservoir 2) Pump / Pumpe / Pompe 3) One or more reference meters / Ein oder mehrere Referenz Messgeräte / un ou plusieurs débitmètres de référence 4) Meter under test / Messgerät unter Prüfung / Débitmètre en test 5) Control valve / Kontrollventil / Vanne de régulation 6) Diverter / Kippachse / Becule 7) Weighing tank / Gewichtsmessgerät / Cuve de mesure 8) Drain valve / Abflussventil / Vanne de vidange 9) Valve to switch between reference meter method and static/dynamic weighing method / Ventil zum switchen zwischen Referenz Methode und statische/dynamische Gewichtsmessung Methode / Vanne de basculement entre méthode avec débitmètres de référence et méthode par pesée statique or dynamique</p>																	

Traceability / Rückverfolgbarkeit / Traçabilité

The Siemens flowmeter calibration process is ISO9001-certified, ensuring the entire calibration procedure is controlled to the highest quality standards.

All primary measuring instrumentation used by the Siemens Flow Laboratory during the performance of its calibrations, has been calibrated with international standards traceability referring directly to the physical unit of measurement according to the International System of Units (SI). Therefore the calibration certificate ensures recognition of the test results worldwide, including the US (NIST traceability).

Der Siemens Kalibrierungsprozess für Durchflussmessgeräte ist ISO9001 zertifiziert, sicherstellend, dass das ganze Kalibrierungsverfahren nach den höchsten Qualitätsstandards kontrolliert ist.

Alle Hauptmessinstrumente, die zur Durchführung der Kalibrierungen vom Siemens Durchfluss Laboratorium genutzt werden, sind kalibriert, um eine Rückverfolgbarkeit auf internationale Normen sicherzustellen. Dies bezieht sich direkt auf die Maßeinheit gemäß dem internationalen Einheitensystem (SI). Das Kalibrierungszertifikat gewährleistet daher die Anerkennung der Prüfergebnisse weltweit, einschließlich in den USA (NIST-Rückverfolgbarkeit).

Le processus d'étalonnage des débitmètres Siemens est certifiée ISO9001 et est contrôlé périodiquement selon les normes qualités en vigueur les plus élevées.

Tous les instruments de mesure primaires utilisés dans les laboratoires Siemens Flow durant les opérations d'étalonnage ont été étalonnés en conformité avec les normes internationales relatives à l'unité de mesure physique, conformément au système international d'unités (SI). Le certificat d'étalonnage garantit ainsi que les résultats obtenus lors des essais sont conformes aux normes internationales, y compris NIST (USA).

Siemens SAS

Etablissement de Haguenau
1, Chemin de la Sandlach
CS60189
F - 67506 Haguenau Cedex

Tel (+33) 03.69.06.65.55
Fax (+33) 03.69.06.66.66

Page 2

รูปที่ ข.3 (ต่อ) แสดงผลการสอบเทียบของ Electromagnetic flow meter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pressure Measurement Pressure transmitters for applications with advanced requirements (Advanced) SITRANS P320/420 for gauge pressure (pressure series)	
SITRANS P320/SITRANS P420 for gauge pressure (pressure series)	
Measuring accuracy	
Reference conditions	<ul style="list-style-type: none"> According to IEC 62828-1 Rising characteristic curve Lower range value 0 bar/kPa/psi Seal diaphragm stainless steel Measuring cell with silicone oil filling Room temperature 25 °C (77 °F)
Conformity error at limit point setting, including hysteresis and repeatability	
Measuring span ratio r (spread, Turn-Down)	$r = \text{max. measuring span/real measuring span and nominal measuring range}$
<ul style="list-style-type: none"> Linear characteristic curve - 250 mbar/25 kPa/3.6 psi 	$r \leq 1.25:$ $\leq 0.075\%$ (SITRANS P320) $\leq 0.065\%$ (SITRANS P420)
<ul style="list-style-type: none"> - 1 bar/100 kPa/14.5 psi 4 bar/400 kPa/58 psi 16 bar/1.6 MPa/232 psi 63 bar/6.3 MPa/914 psi 160 bar/16 MPa/2321 psi 	$1.25 < r \leq 30:$ $\leq (0.008 \cdot r + 0.055)\%$ $r \leq 5:$ $\leq 0.065\%$ (SITRANS P320) $\leq 0.04\%$ (SITRANS P420)
<ul style="list-style-type: none"> - 400 bar/40 MPa/5802 psi 700 bar/70 MPa/10152 psi 	$5 < r \leq 100:$ $\leq (0.004 \cdot r + 0.045)\%$ $r \leq 3:$ $\leq 0.075\%$ (SITRANS P320) $3 < r \leq 100:$ $\leq (0.005 \cdot r + 0.05)\%$ (SITRANS P320)
	$r \leq 5:$ $\leq 0.075\%$ (SITRANS P420) $5 < r \leq 100:$ $\leq (0.005 \cdot r + 0.05)\%$ (SITRANS P420)
Influence of ambient temperature in % per 28 °C (50 °F)	
<ul style="list-style-type: none"> 250 mbar/25 kPa/3.6 psi 1 bar/100 kPa/14.5 psi 	$\leq (0.16 \cdot r + 0.1)\%$ $\leq (0.05 \cdot r + 0.1)\%$
<ul style="list-style-type: none"> 4 bar/400 kPa/58 psi 16 bar/1.6 MPa/232 psi 63 bar/6.3 MPa/914 psi 160 bar/16 MPa/2321 psi 400 bar/40 MPa/5802 psi 700 bar/70 MPa/10152 psi 	$\leq (0.025 \cdot r + 0.125)\%$ $\leq (0.08 \cdot r + 0.16)\%$
Long-term stability at ± 30 °C (± 54 °F)	
<ul style="list-style-type: none"> 250 mbar/25 kPa/3.6 psi 1 bar/100 kPa/14.5 psi 	$\leq (0.25 \cdot r)\%$ per year In 5 years $\leq (0.25 \cdot r)\%$ In 10 years $\leq (0.35 \cdot r)\%$
<ul style="list-style-type: none"> 4 bar/400 kPa/58 psi 16 bar/1.6 MPa/232 psi 63 bar/6.3 MPa/914 psi 160 bar/16 MPa/2321 psi 400 bar/40 MPa/5802 psi 700 bar/70 MPa/10152 psi 	In 5 years $\leq (0.125 \cdot r)\%$ In 10 years $\leq (0.15 \cdot r)\%$ In 5 years $\leq (0.25 \cdot r)\%$ In 10 years $\leq (0.35 \cdot r)\%$
Step response time T_{E3} (without electrical damping)	
	≤ 0.105 s
Effect of mounting position (in pressure per change of angle)	
	≤ 0.05 mbar/0.005 kPa/0.000725 psi per 10° incline (zero point correction is possible with position error compensation)
Effect of auxiliary power (in % per voltage change)	
	0.005% per 1 V

รูปที่ ข.4 แสดงผลการสอบเทียบ Pressure transmitter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้